



Universidad  
Carlos III de Madrid

Ingeniería Técnica Industrial: Electrónica Industrial

Departamento de Tecnología Electrónica

PROYECTO FIN DE CARRERA

# Analizador de Espectros y Cálculo de Incertidumbres

- Octubre 2015 -

Autor: Luis de Paúl Garzón

Tutor: José Antonio García Souto

Director: Alberto Campillo



## Agradecimientos

Este proyecto está dedicado en primer lugar a mis amigos y compañeros de carrera,  
por ayudarme a formarme como persona.

Dedico también este proyecto al personal docente de la Universidad Carlos III de  
Madrid.

Por supuesto a mi familia, a mis hermanos y mis padres, por animarme y darme apoyo  
en todo momento.

Quiero agradecer especialmente este proyecto a mi mujer, porque sin ella, su apoyo y  
su cariño, esto no se habría conseguido. Gracias.

Por último, quisiera dedicárselo a Alberto Campillo, de Keysight Technologies Spain, ya  
que gracias a él he podido comprender el mundo de la metrología.

# Resumen

---

Cuando se emplea un equipo de instrumentación electrónica para realizar una medida, el valor obtenido no es el valor real de la magnitud que se desea conocer. El valor medido se asemeja al valor verdadero tanto más cuanto mayor precisión tenga el instrumento de medición y el procedimiento empleado, pero no será el mismo.

Por lo tanto, cuando se realiza una medida no basta con conocer el resultado de la misma, sino que además es necesario conocer el valor que nos determine la proximidad de lo medido con el valor real. Este valor asociado se denomina *Incertidumbre de Medida*.

En este proyecto se realiza precisamente el cálculo de ésta incertidumbre para un equipo concreto, un analizador de espectros, equipo ampliamente utilizado en la industria para el estudio de señales y respuesta de dispositivos.

# Abstract

---

When an electronic measurement instrument is employed to obtain a measure of a magnitude, the measurement obtained is not the actual one. The measured value is close to the actual value, but is not the same. It will depend of the instrument and procedure employed to take the measure on how close to the actual value the measure will be.

Therefore, when we make a measure, it is not enough to know the value taken by the instrument. In addition, we need to know a value associated to the measure that will indicate how close of the actual value we are. This associated value is known as *Measurement Uncertainty*.

In this final year project, this measurement uncertainty will be calculated, and to be more precise, the calculation will be done for spectrum analyzers, a widely used, measurement instrument in the industry for signal analysis and devices behavior study.

# Indice

---

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Indice.....	3
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	8
Capítulo 1.    Introducción.....	9
1.1    Introducción.....	9
1.1.1.    Contenido de la memoria.....	11
1.2    Objetivos.....	11
1.3    Entorno de pruebas.....	12
1.3.2.    Trazabilidad.....	13
Capítulo 2.    Estado del Arte.....	16
Capítulo 3.    Teoría de Incertidumbres.....	20
3.1    Incertidumbre de Medida.....	20
3.1.1.    Ideas Generales.....	20
3.1.2.    Causas de la Incertidumbre de Medida.....	21
3.1.3.    Clasificación de la Incertidumbre.....	22
3.1.4.    Mediciones.....	23
3.2    Evaluación de la Incertidumbre.....	24
3.2.1.    Evaluación de la incertidumbre Tipo A.....	24
3.2.2.    Evaluación de la Incertidumbre Tipo B.....	25

3.3	Distribuciones de Probabilidad.....	26
3.3.2.	Distribución Normal Gaussiana .....	28
3.3.3.	Distribución Uniforme o Rectangular .....	33
3.3.4.	Distribución Trapezoidal .....	34
3.3.5.	Distribución U-Shaped.....	35
3.4	Ley de Propagación de Incertidumbres.....	39
3.5	Teorema Central de límite.....	41
3.6	Incertidumbre Expandida .....	41
3.6.1.	Cálculo de k para Distribución Normal Asumiendo el Teorema del Límite.....	42
3.6.2.	Cálculo de k para Distribución Normal en la que es posible asumir el Teorema Central del Límite.....	43
	Tabla 3.1. Tabla t de student .....	45
3.6.3.	Caso para una distribución normal no justificada. ....	46
3.7	Expresión de la incertidumbre de medida en los certificados de calibración....	52
Capítulo 4.	Analizadores de Espectros. Evolución y Comparativa. ....	54
4.1	El Analizador de Espectros .....	54
4.2	Frecuencia vs. Tiempo .....	55
4.3	Clasificación de los Analizadores de Espectros .....	58
4.4	Teoría de funcionamiento.....	60
4.4.2.	Mezclador .....	61
4.4.3.	Filtro de IF .....	63
4.4.4.	Detector .....	64
4.4.5.	Filtro de Video .....	65
4.4.6.	Otros Componentes.....	66

4.4.7. Analizador de Espectros en la actualidad.....	68
4.5 Especificaciones, Precisión (frecuencia y Amplitud) .....	70
Tabla 4.1. Incertidumbres tipo de fuentes de error .....	71
4.6 Factores de incertidumbre de amplitud en un analizador de espectros de la familia ESA. ....	73
4.6.1. Incertidumbre relativa .....	73
4.6.2. Incertidumbre de amplitud absoluta.....	74
4.6.3. Factores de incertidumbre en amplitudes relativas .....	74
4.6.4. Factores de incertidumbre en amplitudes absolutas.....	77
Capitulo 5. Cálculo de Incertidumbres para un Analizador de Espectros.....	79
Tabla 5.1. Instrumentación Empleada .....	80
5.2 Precisión de Amplitud Absoluta.....	80
Tabla 5.2. Tabla de Incertidumbres Precisión Amplitud.....	88
5.3 Distorsión del segundo armónico .....	89
Tabla 5.3. Tabla de Incertidumbres SHD .....	98
5.4 Fidelidad de escala del display .....	100
Tabla 5.4. Tabla de Incertidumbres Scale Fidelity .....	107
5.5 Conmutación del Atenuador de Entrada .....	109
Tabla 5.5. Tabla de incertidumbres Conmutación del atenuador de entrada.....	117
5.6 Comentarios al Cálculo de Incertidumbres.....	118
Capitulo 6. Estudio Económico.....	120
Tabla 6.1. Análisis de Costes .....	120
Capitulo 7. Conclusiones.....	122
7.1 Futuros trabajos .....	123



7.2 Mejoras .....	123
REFERENCIAS.....	124
ANEXOS .....	126
ANEXO I. Diagrama de flujo de Tabla de Excel .....	127
ANEXO II. Especificaciones ESA E4405B .....	128
ANEXO III. NORMA ISO/IEC 17025 .....	148

## Índice de figuras

---

Figura 1.1. Estación de calibración RF.....	12
Figura 1.2. Pirámide de Trazabilidad.....	14
Figura 3.1. Distribución Normal Gaussiana.....	27
Figura 3.2. Ejemplos de Gaussianas.....	28
Figura 3.3. Gaussiana Nivel confianza 68.27 %.....	31
Figura 3.4. Gaussiana Nivel de Confianza 95.45 % .....	32
Figura 3.5. Gaussiana Nivel de Confianza 99.73 % .....	32
Figura 3.6. Distribución Rectangular .....	33
Figura 3.7. Distribución Trapezoidal.....	34
Figura 3.8. Distribución en forma de U (U-Shaped) .....	38
Figura 3.9. Distribución Rectangular .....	48
Figura 3.10. Trapezoidal Simétrica.....	50
Figura 4.1. Analizador de Espectros .....	54

Figura 4.2.	Aspectos de los tipos de medida.....	55
Figura 4.3.	Dominios del tiempo, frecuencia y amplitud .....	56
Figura 4.4.	Analizador de Fourier .....	58
Figura 4.5.	Analizador de Barrido.....	59
Figura 4.6.	Analizador de espectros. Familia ESA. ....	60
Figura 4.7.	Funcionamiento. Diagrama de bloques.....	61
Figura 4.8.	Mezclador.....	62
Figura 4.9.	Filtro IF .....	63
Figura 4.10.	Detector de Evolvente .....	64
Figura 4.11.	Filtro de video.....	65
Figura 4.12.	Diagrama de bloques: el LO, el generador de barrido y el display .....	66
Figura 4.13.	Diagrama de bloques: Atenuado de entrada y amplificador IF .....	67
Figura 4.14.	Funcionamiento.....	68
Figura 4.15.	Gráfico comparación .....	69
Figura 4.16.	Comparativa Analógico / digital .....	72
Figura 4.17.	Ejemplo incertidumbre relativa .....	73
Figura 5.2.	Caracterización del Power Splitter.....	81
Figura 5.3.	Medida del Analizador de espectros .....	81
Figura 5.4.	Conexión Segundo armónico .....	90
Figura 5.5.	Conexión Scale Fidelity .....	100
Figura 5.6.	Conexión conmutación de atenuador de entrada.....	109
Figura 5.7.	Hoja de resultados Conmutación del atenuador de entrada .....	119

# Índice de tablas

---

Tabla 3.1. Tabla t de student.....	45
Tabla 4.1. Incertidumbres tipo de fuentes de error.....	71
Tabla 5.1. Instrumentación Empleada.....	80
Tabla 5.2. Tabla de Incertidumbres Precisión Amplitud .....	88
Tabla 5.3. Tabla de Incertidumbres SHD .....	98
Tabla 5.4. Tabla de Incertidumbres Scale Fidelity.....	107
Tabla 5.5. Tabla de incertidumbres Conmutación del atenuador de entrada .....	117
Tabla 6.1. Análisis de Costes .....	120

# Capítulo 1. Introducción

---

Este proyecto está enfocado al estudio y conocimiento del mundo de la medida en la instrumentación electrónica en general, y de los analizadores de espectros en particular.

## 1.1 Introducción

La instrumentación electrónica es un campo fundamental dentro de la industria en la actualidad. Aunque ha pasado claramente el apogeo de la tecnología, y en el mundo del 4G y pronto del 5G, ésta sea la tecnología a desarrollar e investigar, la industria seguirá necesitando conocer a la mayor precisión posible la exactitud o inexactitud de la instrumentación que emplee, ya sea para controlar una línea de producción, control de calidad, parametrizar dispositivos pasivos, o simular un entorno real.

En este contexto, es fácil comprender el por qué es necesario una alta calidad en la calibración de la instrumentación electrónica. El empleo de un equipo que no esté dentro de especificaciones, o que no esté calibrado puede hacer que unas medidas que hemos considerado válidas no lo sea, y la consecuencia puede llegar a suponer desde perder toda una serie de fabricación hasta además causar un daño irreparable a la imagen de calidad de una empresa, con las pérdidas, no ya solo materiales, sino también de cara al futuro que ello supone.

Una alta calidad en tu proceso de fabricación debe ser un requisito tan indispensable como la calidad del producto que tu empresa fabrique o quiera vender. Tanta calidad tendrás como calidad exijas en tu línea de producción. Esto es aplicable al 100% también en el caso de laboratorios de investigación, ya que la veracidad de los resultados dependerá en gran medida también de la calidad de tu instrumentación.

En Keysight Technologies, heredera directa de Hewlett y Packard, este axioma es una de sus razones de ser. Para Keysight Technologies, su filosofía de empresa es cuidar a

sus clientes como si fuesen socios, y esto pasa por poder dar un servicio de postventa con las cotas más altas de exigencia.

Keysight Technologies, y con anterioridad Agilent Technologies y Hewlett-Packard, quiere que si un cliente adquiere uno de sus instrumentos de medida electrónica, éste no solo esté adquiriendo el mejor equipo del mercado, sino que también alargue la vida del mismo el máximo tiempo posible, sin alterar la calidad de las mediciones.

De esta necesidad del cliente de prolongar la vida de su instrumentación nace la filosofía de servicio y soporte que mantiene Keysight en la actualidad, siendo pionero en muchos campos y obligando a la competencia a transformarse. Keysight asegura y certifica que si se manda un equipo a sus instalaciones para una calibración, y ésta pasa todos los tests dentro de especificaciones, éste tiene un rendimiento exactamente igual que cuando salió de fábrica, tenga la antigüedad que tenga.

Dada la importancia, por tanto, que tienen los tests que pasa un instrumento cuando es calibrado, Keysight ahora, y antes Agilent y HP, han dedicado muchos recursos a que sus procedimientos de medida sean tan buenos y con tanta calidad como sus equipos. Cuanto mejor sea un procedimiento de medida, más exacta será la medida que estés tomando, por lo que más seguro estarás que el rendimiento del equipo es óptimo.

Y aquí es donde entra en juego el cálculo de incertidumbres. Desde hace ya algunos años, en Keysight Technologies se trabaja para poder dar en todos y cada uno de sus reportes de medidas, las incertidumbres asociadas a la medida punto a punto. En esto, Keysight Technologies fue pionero dentro de los fabricantes, y aunque ahora es una práctica que se está empezando a extender algo más, Keysight fue la primera en tomárselo como valor añadido para la calidad de sus clientes. Una Calibración Keysight implica una parametrización total del instrumento, incluyendo la incertidumbre del mismo.

Cabe reseñar también que el laboratorio de Keysight Technologies España está acreditado por ENAC, siguiendo la norma ISO 17025, y el cálculo de incertidumbres es criterio exigido para la acreditación, como vamos a ver en el apartado en el que se explica la trazabilidad. Esto resalta aún más si cabe la importancia del cálculo de incertidumbres.

### 1.1.1. Contenido de la memoria

Durante los siguientes capítulos se dará conocimiento de la matemática necesaria para el cálculo de incertidumbres, y en concreto se resolverá para el equipo seleccionado.

Así, en el Capítulo 2, Estado del Arte, se explica a grandes rasgos qué es la el cálculo de incertidumbres, su evolución, el objetivo y se mencionan diferentes estamentos relacionados con ello.

En el Capítulo 3, Teoría de incertidumbres, se explica la matemática necesaria para hacer el cálculo de incertidumbres, así como las técnicas que se emplear para facilitar el cálculo de la misma.

El Capítulo 4 sirve para comprender qué es un analizador de espectros, y su funcionamiento pormenorizado, analizado por bloques. También se explica cómo influyen diferentes partes del analizador a la incertidumbre.

El Capítulo 5 es el cálculo de incertidumbres para un analizador de espectros, aplicado a medidas de amplitud, en 4 pruebas significativas escogidas de la guía del fabricante.

Finalmente en el capítulo 6 se hace un pequeño estudio económico en el que se explica el presupuesto requerido para la realización del proyecto, y en el capítulo 7 se exponen las conclusiones.

## 1.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es mostrar el cálculo de incertidumbres que se ha realizado para un analizador de espectros, en medidas de potencia, ya sea absoluta o relativa. Primero explicaremos qué es la incertidumbre de medida y su evolución. Después estudiaremos el funcionamiento de un analizador de espectros, y veremos cómo con

los modernos analizadores se consigue reducir hasta la tercera parte el error por incertidumbre de medida, y por último haremos e cálculo propiamente dicho de las incertidumbres que atañen a este proyecto.

### 1.3 Entorno de pruebas.

Las pruebas se van a realizar en el Laboratorio de Test y Medida de Keysight Technologies en Madrid.

Este laboratorio está permanente controlado y monitorizado las condiciones de temperatura y humedad, de manera que permanecen constantes entre  $23 \pm 3$  °C y  $40 \pm 20$  % de humedad.

La siguiente fotografía muestra cómo es el laboratorio de Keysight Technologies donde se han realizado las pruebas (figura 1.1):



Figura 1.1. Estación de calibración RF

Lo que se observa en la figura 1.1 es el 'rack' de equipos de calibración para instrumentos de RF. Todos los equipos de Radio Frecuencia se calibran aquí. Esto es una 'Estación de Calibración'.

Para su realización, los equipos intervinientes en los test deben permanecer calentando durante al menos 4h antes de realizar ninguna medición (para medidas de tiempo y frecuencia, el mínimo tiempo de calentamiento debe ser de 24h).

### **1.3.2. Trazabilidad**

El Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), en su 3ª edición, define el concepto de “Trazabilidad Metrológica” como:

“Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida”.

En el ámbito de la Metrología, la trazabilidad de los resultados de medida es un elemento clave para garantizar la correcta diseminación de las diferentes unidades de medida desde los patrones nacionales o internacionales o, en general, de referencia, hasta los patrones e instrumentos de medición de la industria.



La trazabilidad metrológica garantiza que los resultados de medida sean comparables entre sí, independientemente del lugar y tiempo en que se hayan realizado facilitando el que puedan ser universalmente aceptados.



Figura 1.2. Pirámide de Trazabilidad

En la figura 1.2 de la página anterior podemos ver la pirámide de la trazabilidad. Los laboratorios de calibración deben garantizar que los resultados de medida de sus servicios sean trazables metrológicamente.

La trazabilidad metrológica consiste en una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones hasta una referencia (patrón de medida, realización práctica de la definición de una unidad de medida o un procedimiento de medida) mediante procedimientos de medición (documentados), que permiten relacionar los resultados de medida, en general a las unidades del Sistema Internacional (SI), legalmente establecido en España, con una incertidumbre de medida conocida y documentada.

Para que esa secuencia de calibraciones sea eficaz, cada una de las calibraciones debe:

- haberse realizado por personal con la necesaria formación y cualificación técnica;
- haberse realizado con equipos que aseguren su correcto estado de calibración y mantenimiento.
- haber sido realizada con una incertidumbre de medida adecuada a la finalidad;
- estar documentada de manera que se aporte de forma clara toda la información necesaria.

En definitiva, cada una de las calibraciones debe haberse desarrollado con la competencia técnica necesaria, y la forma reconocida internacionalmente para asegurar la competencia técnica en la realización de calibraciones es el cumplimiento de la norma ISO/IEC 17025 así como la acreditación, la garantía de su cumplimiento.

## Capítulo 2. Estado del Arte

---

Para llevar a cabo una determinación cuantitativa de una propiedad física, es necesario el empleo de instrumentos de medida. Los valores de las magnitudes obtenidas con estos instrumentos, sea cual sea su complejidad y sensibilidad, siempre tienen asociadas unas imprecisiones que denominamos incertidumbres experimentales. La adecuada valoración y acotación de estas incertidumbres es lo que se detalla en las páginas sucesivas. El Vocabulario Internacional de Metrología, la define como “un parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente podrían ser atribuidos al mensurando”

La estimación de la incertidumbre que acompaña a una medida, o al resultado de un experimento, no siempre es sencilla. Ello es debido a que en el proceso de medida intervienen un gran número de factores externos que no podemos controlar, los cuales afectan de forma imprevisible al resultado de aquél.

Si las mediciones se hacen directamente, la incertidumbre dependerá tanto de la precisión del aparato utilizado, como de la habilidad y cuidado empleados por el técnico. Sin embargo, si la magnitud física a determinar proviene de otras magnitudes, a través de una dependencia funcional, el problema de la precisión del resultado se complica y debe ser tratado mediante criterios estadísticos.

El cálculo de incertidumbres está en evolución constante, de manera que cada vez se tiene una mejor estimación de la incertidumbre asociada a la medida.

En un principio, no se estimaba ninguna incertidumbre asociada a la medida; conforme fue evolucionando tanto la técnica de medición (el procedimiento), como la tecnología empleada, surgió la necesidad de saber entre qué valores está realmente midiendo el instrumento de medida.

La herramienta usada para el cálculo fue la matemática: probabilidad estadística. Ésta se empezó a aplicar para calcular este error de medida. Inicialmente se aplicó la **Ley de Propagación de Incertidumbres**.

Se suponía que el resultado cumplía el Teorema Central del Límite, por lo que la incertidumbre calculada tendía a una distribución normal gaussiana. La confianza que se obtenía era del 68.2%, en el peor de los casos, ya que la incertidumbre se asociaba directamente a la desviación típica de esta distribución, demasiado elevada.

Observando que la fiabilidad de la incertidumbre calculada no era suficientemente elevada, se acordó aumentar la incertidumbre asociada a la medida al menos a un 95.45% de confianza.

Esto se consiguió multiplicando por un determinado valor, el Factor de Cobertura, la incertidumbre, obteniéndose entonces la denominada **Incertidumbre Expandida**. El Factor de Cobertura concretamente es de  $k=2$ , con lo que ahora la incertidumbre se asocia con una dispersión del doble de la desviación típica de una distribución rectangular.

Un avance en el Cálculo de Incertidumbres fue asumir el cumplimiento del Teorema Central del Límite, ya que no siempre existen suficientes componentes que contribuyen a la incertidumbre como para asumir la tendencia de la misma a una distribución normal.

Para ello, en este caso se calculan los Grados de Libertad y a través de la t-Student se calcula el Factor de Cobertura asociado a la incertidumbre de medida.

En muchas ocasiones se observa que existen contribuciones a la incertidumbre de alto peso y que no son de distribución normal por lo que hay que estudiar entonces si la incertidumbre calculada mediante la **Ley de Propagación de Incertidumbre** tiende a la distribución dominante o en caso contrario a una normal; esto cambiará el Factor de Cobertura.

La **EA, European co-operation for Accreditation**, empresa no lucrativa que fue creada en 1997, es una asociación que resulta de la fusión de EAC, Acreditación Europea de la Certificación, y de EAL, cooperación europea de los cuerpos de reconocimiento de para la acreditación de laboratorios.

EA es la red europea de entidades nacionales de reconocimiento de acreditación de las distintas áreas geográficas europeas.

Uno de sus documentos inicialmente publicados fue el EAL-R2 que posteriormente se transformó en el actual **EA-4/02**.

El propósito de este documento es armonizar la evaluación de la incertidumbre de medida dentro de la EA; es decir, los requisitos específicos que deben tener los reportes de la incertidumbre de la medida en certificados de calibración publicados por los laboratorios acreditados por ellos. Las reglas de este documento están de acuerdo con las recomendaciones de la **guía a la expresión de la incertidumbre en la medida (GUM)**, publicada por siete organizaciones internacionales referidas a la estandarización y a la metrología.

El documento EA-4/02 estableció los principios y requisitos en la evaluación de la incertidumbre de la medida en la calibración y la declaración de esta incertidumbre en certificados de la calibración. El desarrollo de este documento está de acuerdo con *Guía a la expresión de Incertidumbre en la medida*, primera publicación en 1993 en Noviembre de BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML [1].

El estudio realizado está basado en los pasos que dicta EA-4/02 para el Cálculo de Incertidumbre.

Realizaremos el estudio de los tipos de distribuciones asociadas a cada componente de error según la procedencia de los datos usados para su obtención.

Otra sección que amplía el estudio realizado es el cálculo del Factor de Cobertura calculado en función de la distribución de probabilidad a la que tienda la incertidumbre, y determinaremos si existe una componente dominante o varias y explicaremos la teoría necesaria para poder realizar el cálculo. Se resuelven los casos más típicos que suelen darse en instrumentación electrónica.

Por otro lado se produce el estudio en profundidad del analizador de espectros, equipo al cuál se realiza el Cálculo de Incertidumbre.

El estudio no sólo se basará en el estudio teórico básico del analizador de espectros tradicional, sino que se profundiza en el funcionamiento externo, el funcionamiento interno y todas las especificaciones que tiene el analizador actual, analizador de espectros vectorial.

A la hora de realizar el cálculo de incertidumbres, veremos cómo éste depende de la instrumentación empleada, además de la técnica de medida, en adelante *procedimiento*, desarrollada en cada prueba. Existen diversas técnicas y cada equipo empleado para realizar una prueba introduce una incertidumbre característica, algunas despreciables, otras no. En nuestro caso empleamos las técnicas de medida propias de los procedimientos desarrollados y aplicados por Keysight Technologies para la calibración de sus analizadores de espectros.

## Capítulo 3. Teoría de Incertidumbres

---

### 3.1 Incertidumbre de Medida

La incertidumbre de medida es un parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente pueden atribuirse al mensurando [3]. En otras palabras, la incertidumbre de medida es una información numérica que completa la magnitud medida y nos indica la posible variación entre la medida y el valor verdadero.

#### 3.1.1. Ideas Generales

La expresión del resultado de una medición está completa sólo cuando contiene tanto el valor atribuido al mensurando como la incertidumbre de medida asociada a dicho valor. Todas las magnitudes que no se conocen exactamente se tratan como variables aleatorias, incluso las magnitudes de influencia que pueden afectar al valor medido.

Los mensurandos son las magnitudes particulares objeto de una medición. En calibración, es frecuente que sólo se disponga de un mensurando o magnitud de salida  $Y$ , que depende de una serie de magnitudes de entrada  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ), de acuerdo con la relación funcional  $Y = f(X_i)$ .

La función modelo  $f$  representa el procedimiento de medición y el método de evaluación. Describe cómo se obtienen los valores de la magnitud de salida  $Y$  a partir de los valores de las magnitudes de entrada.

$f$  puede determinarse experimentalmente, existir sólo como un algoritmo de cálculo que deba ser numéricamente evaluado, o ser una combinación de todo ello.

### 3.1.2. Causas de la Incertidumbre de Medida

La incertidumbre del resultado de una medición refleja la falta de un conocimiento completo del valor del mensurando. Un conocimiento completo exigiría una cantidad infinita de información.

Los fenómenos que contribuyen a la incertidumbre y, por tanto, al hecho de que el resultado de una medición no pueda ser caracterizado con un único valor, se denominan fuentes de incertidumbre.

En la práctica, pueden existir muchas fuentes que causan la incertidumbre en una medición, entre ellas las siguientes:

- Definición incompleta del mensurando
- Realización imperfecta de la definición del mensurando
- Muestreo no representativo (la muestra medida no representa el mensurando definido)
- Efectos no adecuadamente conocidos de las condiciones ambientales o mediciones imperfectas de las mismas
- Desviaciones personales en la lectura de instrumentos analógicos
- Límites en la discriminación o resolución del instrumento
- Valores inexactos de los patrones y materiales de referencia utilizados en la medición
- Valores inexactos de constantes y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y utilizados en el algoritmo para la obtención de datos
- Aproximaciones e hipótesis incorporadas en el método y el procedimiento de medición.
- Variaciones en observaciones repetidas del mensurando realizadas en condiciones aparentemente idénticas.



### 3.1.3. Clasificación de la Incertidumbre

La incertidumbre se clasifica en dos grandes 'bloques' o tipos: Incertidumbre *Tipo A* e incertidumbre *Tipo B*

- **Tipo A. Errores aleatorios.** Son al azar, no se pueden prever. Se evalúan con métodos estadísticos. Es un hecho conocido que al repetir una medición utilizando el mismo procedimiento y con las mismas condiciones (el mismo instrumento, operador, temperatura y humedad, etc.) no se logra el mismo resultado.  
En este caso, los errores sistemáticos se mantienen constantes, y las diferencias obtenidas se deben a efectos fortuitos, denominados errores aleatorios. Por ello, una característica general de los errores aleatorios es que no se repiten siempre en el mismo valor y sentido.
- **Tipo B. Errores sistemáticos.** Se pueden prever, pero no evitar. Se evalúan por otros métodos. Se llaman así porque se repiten sistemáticamente en el mismo valor y sentido en todas las mediciones que se efectúen en iguales condiciones. Las causas de estos errores están perfectamente determinadas y pueden ser corregidas mediante ecuaciones matemáticas que eliminen el error. En algunos casos pueden emplearse distintos artificios matemáticos que hacen que la influencia de la perturbación se auto elimine o no afecte al resultado

### 3.1.4. Mediciones

Las mediciones realizadas son muy importantes a la hora de conocer el valor exacto de una medida con su incertidumbre asociada. Es muy importante tanto el procedimiento empleado como la minuciosidad y experiencia del técnico que realiza la prueba. Tenemos dos características asociadas a las medidas:

- Repetitividad. Grado de coincidencia entre los resultados de sucesivas mediciones del mismo mensurando, permaneciendo inalterables las condiciones de medida durante todo el proceso.
- Reproducibilidad. Grado de coincidencia entre los resultados de sucesivas mediciones del mismo mensurando, produciéndose en el proceso variaciones en alguna de las condiciones de medida.

Estas condiciones de medida pueden ser:

- Equipo de medición
- Operador
- Patrón de Referencia
- Magnitudes de Influencia
- Intervalo de Mediciones
- Lugar de Mediciones
- Procedimiento de medida

## 3.2 Evaluación de la Incertidumbre

### 3.2.1. Evaluación de la incertidumbre Tipo A

La evaluación de la incertidumbre Tipo A esta basada en el análisis estadístico de una serie de observaciones independientes y bajo las mismas condiciones de medida [1].

Se evalúa con la desviación típica.

Para ello se realiza la media de las muestras:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)}{n}$$

Donde la Muestra es el conjunto de los valores tomados, pero no todos los de la población.

Desviación típica de la muestra:

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Varianza de la muestra: Es una medida de la dispersión de los datos

$$s^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Varianza de la media muestral:

$$u_A^2 = \frac{s^2(x)}{n}$$

; siendo n el número de muestras.

La incertidumbre tipo A es la raíz cuadrada de la varianza de la media muestral.

### 3.2.2. Evaluación de la Incertidumbre Tipo B

La incertidumbre Tipo B va a venir determinada por los equipos que usamos para realizar la medición. La dificultad se haya en descubrir cuáles son las componentes que afectan a la medida. Para su evaluación, las distintas componentes de error se pueden obtener a partir de:

- Datos medidos previamente.
- Conocimiento del instrumento.
- Especificaciones publicadas en el manual fabricante.
- Datos de calibraciones y certificados.
- Incertidumbres publicadas en datos de referencia de manuales.
- Otras componentes.

### 3.3 Distribuciones de Probabilidad

Representa la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno asumiendo que la distribución es simétrica y que el valor más probable está en el centro.

Según la naturaleza del error, así como el desconocimiento de la probabilidad que presente, se le asigna un tipo de distribución de probabilidad a cada componente.

El área de la curva es la probabilidad de encontrar una variable dentro del intervalo de medida.

Los valores de la variable se distribuyen en torno a su valor medio ( $\mu$ ).

La distribución de los rangos de desviaciones positivas y negativas tienen la misma probabilidad de ocurrencia, es decir, existe una simetría en la curva de distribución.

El valor medio es la mejor estimación que podemos hacer de la cantidad de medida, y la dispersión sobre la medida, representada por la desviación típica ( $\sigma$ ), es la mejor estimación que se puede hacer sobre la desviación de cualquier dato con relación a la media.

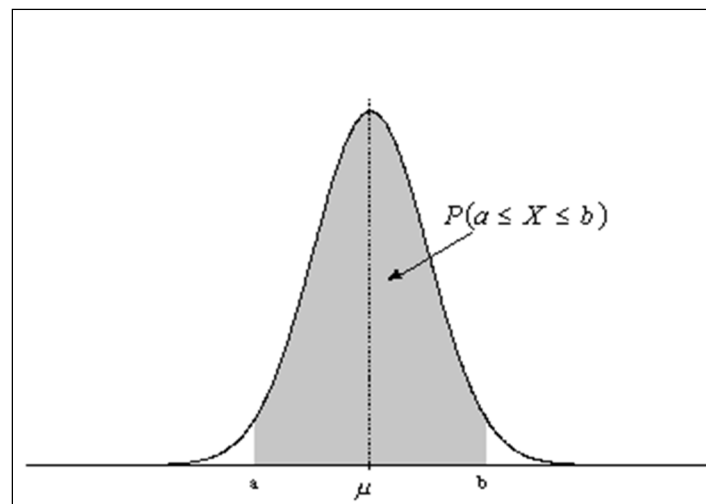


Figura 3.1. Distribución Normal Gaussiana

En la figura 3.1 se muestra una función de distribución de probabilidad Normal Gaussiana. El área sombreada representa la probabilidad de ocurrencia existente dentro de intervalo (a,b)

Propiedades:

$$1. \quad 1 = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx$$

$$2. \quad f(x) \geq 0 \quad \forall x \in R$$

$$3. \quad P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx$$

### 3.3.2. Distribución Normal Gaussiana

Es la distribución más importante, y viene dada por:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right]^2} \quad (-\infty < x < \infty)$$

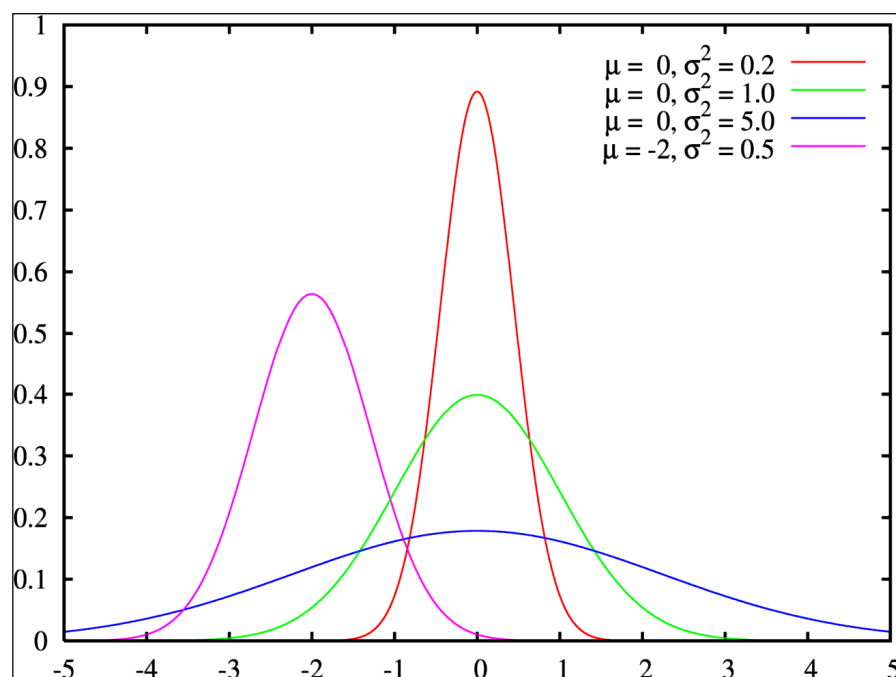


Figura 3.2. Ejemplos de Gaussianas

En la figura 3.2 se muestra distintas distribuciones de probabilidades normales de diferentes medias y desviaciones típicas.

Propiedades:

- El valor de mayor probabilidad está en  $x = \mu$
- La curva es simétrica respecto  $x = \mu$
- La curva tiene su punto de inflexión en  $x = \mu + \sigma$
- El área total bajo la curva es 1

$$E(x) = \mu \quad \text{y} \quad E(x^2) = \sigma^2$$

---


$$\text{Dem. 1:} \quad E(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right]^2} dx = \mu$$


---

Si hacemos el cambio:

$$z = \frac{(x-\mu)}{\sigma} \Rightarrow dx = \sigma dz$$

Obtendremos:

$$E(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (\mu - \sigma \cdot z) \cdot e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} z \cdot e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$



Como:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int z \cdot e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 1 \quad y \quad \int e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0$$

$$\boxed{E(x) = \mu \quad \text{c.q.d.}}$$

Dem. 2:

$$E[(x - \mu)^2] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int (x - \mu)^2 \cdot e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right]^2} dx = \sigma$$

Si hacemos el cambio:

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \Rightarrow dx = \sigma dz$$

Obtendremos:

$$E[(x - \mu)^2] = \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \int z^2 \cdot e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Resolvemos la integral por partes:

$$u = z;$$

Cambio de variable:

$$dv = z \cdot e^{\frac{-z^2}{2}} dz$$

Resuelvo:

$$\int u \cdot dv = u \cdot v - \int v \cdot dv$$

Y obtengo:

$$E(x^2) = \sigma^2 \quad \text{c.q.d.}$$

En las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 que se muestran a continuación, podemos observar una distribución normal gaussiana de desviación típica  $\sigma=1$  y una media  $\mu=0$ .

Se puede observar que para una serie de valores el 68.27% de los mismos estarán comprendidos en la dispersión de  $\pm\sigma$

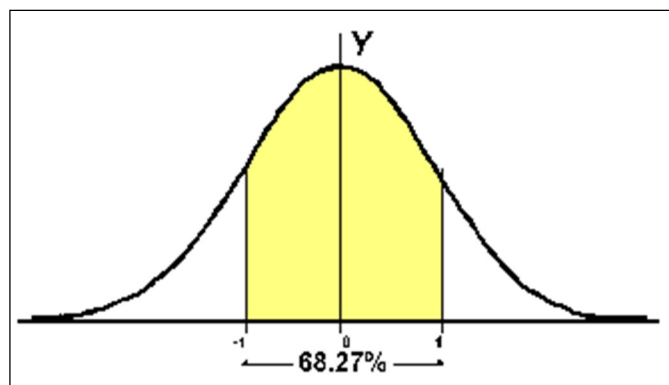


Figura 3.3. Gaussiana Nivel confianza 68.27 %

El 95.45% de los valores estarán comprendidos en la dispersión de  $\pm 2\sigma$

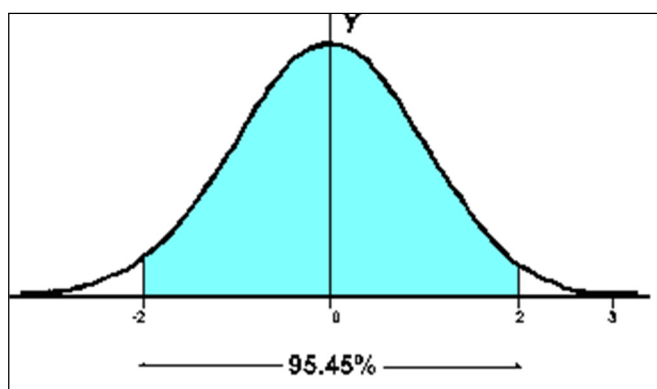


Figura 3.4. Gaussiana Nivel de Confianza 95.45 %

Y el 99.73% de los valores estarán comprendidos en la dispersión  $\pm 3\sigma$

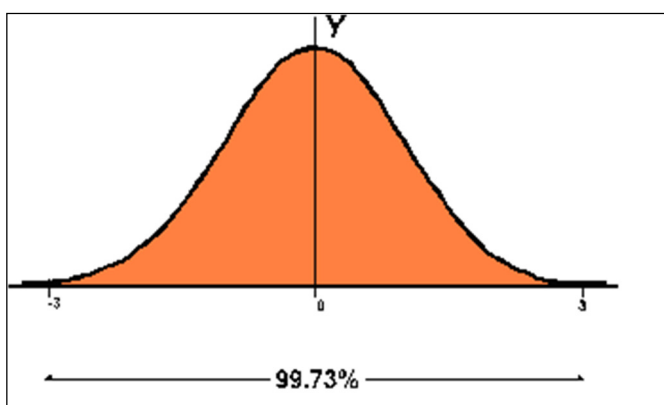


Figura 3.5. Gaussiana Nivel de Confianza 99.73 %

### 3.3.3. Distribución Uniforme o Rectangular

Esta distribución indica que existe la misma probabilidad de ocurrencia en todo el intervalo.

Una probabilidad de distribución rectangular debe ser asignada cuando los límites de las especificaciones de fábrica son usados como incertidumbre. Pocas veces existe un grado de confianza con las especificaciones, en este caso se asume una distribución normal.

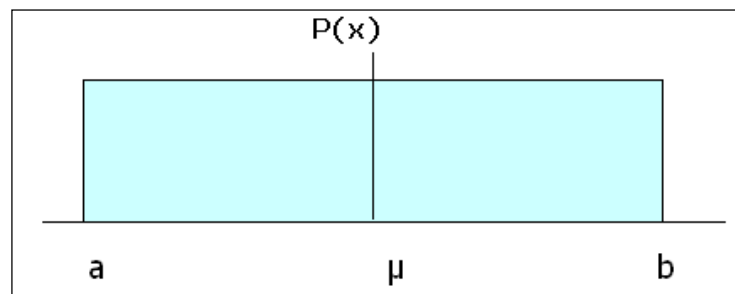


Figura 3.6. Distribución Rectangular

En la figura 3.6 se muestra una distribución de probabilidad rectangular.

- Media:  $\mu = \frac{(a+b)}{2}$
- Varianza:  $\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$
- Si  $b = -a \Rightarrow \text{Var}(x) = E[x^2] = \int_{-a}^a x^2 \cdot P(x) \cdot dx = \left[ \frac{x^3}{3a} \right]_{-a}^a = \frac{a^2}{3}$

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Cuando 'a' es el valor límite del semirango de la incertidumbre individual.

### 3.3.4. Distribución Trapezoidal

Si disponemos de más información es posible asignar una diferente tipo de distribución

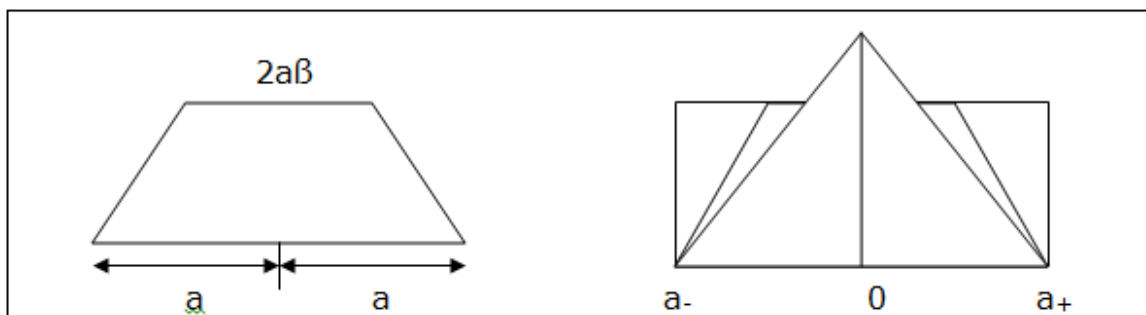


Figura 3.7. Distribución Trapezoidal

La figura 3.7 representa las distribuciones trapezoidales que se pueden obtener.

- $\beta=1$       Distribución Rectangular:

Si  $a_+$  es igual  $a_-$       
$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Si  $a_+$  es distinta de  $a_-$       
$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}}$$

- $\beta=0$  Distribución Triangular:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

$$\text{var}(x) = u^2 = \int_{-a}^a x^2 \cdot P(x) \cdot dx = \int_0^a x^2 \cdot \frac{(a-x)}{a^2} \cdot dx = \frac{a^2}{6}$$

- $\beta \neq 0,1$  Distribución Trapezoidal:

$$u(x_i) = \frac{a^2(1+\beta^2)}{6}$$

### 3.3.5. Distribución U-Shaped

Esta distribución está asociada con la incertidumbre Mismatch.  $\Gamma_L$  y  $\Gamma_G$  (coeficientes de reflexión) raras veces son conocidos. Solo el módulo,  $\rho_L$  y  $\rho_G$  respectivamente, son normalmente medidos o especificados, pero tenemos carencia de información relativa a la fase. Podemos encontrar los valores máximos y mínimos a los que llamamos límites de incertidumbre Mismatch.

$$\Gamma = \rho \cdot e^{j\theta}$$

El máximo se obtiene cuando  $\Gamma_L$  y  $\Gamma_G$  se suman en fase.

$$Mu_{\text{Max}}(\text{dB}) = 10 \cdot \text{Log}(1 + \rho_L \rho_G)^2$$

El mínimo valor de la incertidumbre mismatch ocurre cuando  $\Gamma_L$  y  $\Gamma_G$  se suman con fases opuestas.

$$Mu_{\text{Min}}(\text{dB}) = 10 \cdot \text{Log}(1 - \rho_L \rho_G)^2$$

Si el mismatch viene dado en tanto por ciento la formula quedaría:

$$Mu(\%) = 100[(1 \pm \rho_L \rho_G)^2 + 1]$$

El límite de incertidumbre mismatch se puede calcular a través de la ecuación:

$$Mu = (1 - \rho_L \rho_G)^2$$

Donde  $Mu$  es la ganancia o pérdidas de la reflexión múltiple entre el generador y la carga. Si la fase y el módulo de ambos son conocidos,  $Mu$  puede ser determinada con precisión con la ecuación. Generalmente se puede obtener el módulo, pero la fase es desconocida.

Consideraremos dos casos entonces:

- Caso a:  $\Gamma$  uniforme, distribución de fase uniforme:

$$u(Mu) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|$$

- Caso b:  $\rho$  constante, distribución de fase uniforme. Harrys & Warner muestran como la distribución para la incertidumbre mismatch tendrá una distribución de tipo U-shaped.

$$u(Mu) = \frac{2.\Gamma_G.\Gamma_L}{\sqrt{2}} \Rightarrow u(Mu) = \sqrt{2}.\Gamma_G.\Gamma_L$$

Representación de la distribución U-shaped

Comenzamos con:

$$y = |1 - \rho_L \rho_G|^2$$

$$y = |\rho_L|^2 \cdot |\rho_G|^2 + 1 - 2 \cdot |\rho_L| \cdot |\rho_G| \cdot \cos\theta$$

Simplificando la formula obtenemos:

$$y = 1 - 2 \cdot |\rho_L| \cdot |\rho_G| \cdot \cos\theta$$

luego,  $y = f(\theta)$

Podemos calcular la varianza de la función, usando la Función de Densidad de probabilidad:

$$f(y) = \sum_{i=1}^n \frac{y(\theta)}{\left| \frac{d(y)}{d(\theta)_n} \right|}$$



Si representamos la función normalizada a 1 obtenemos la distribución U-shaped, cuando los límites están entre -1 y 3.

$$f(y) = \frac{|\Gamma_L| |\Gamma_G|}{\pi \sqrt{3 + 2y - y^2}}$$

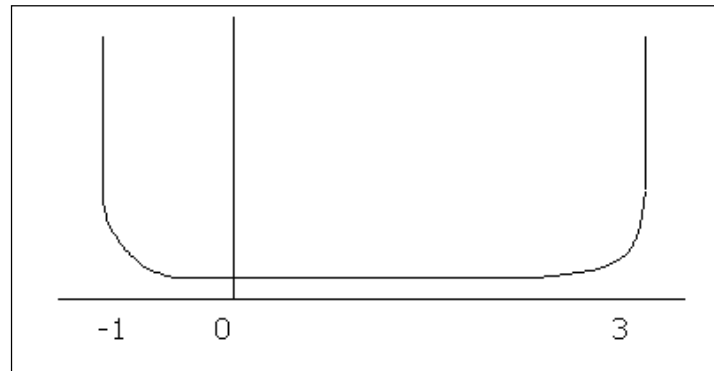


Figura 3.8. Distribución en forma de U (U-Shaped)

En la figura 3.8 se observa la forma de la función densidad de probabilidad U-Shaped.

Formulas:

El valor del límite de la incertidumbre tipo mismatch, M, está asociado con la transferencia de potencia para una función, obtenida de:

$$20 \log(1 \pm |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|) \text{ (dB)} \quad \text{ó} \quad 100 \left( (1 \pm |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|)^2 - 1 \right) \text{ (\%)}$$

Donde  $\Gamma_G$  y  $\Gamma_L$  son los coeficientes de reflexión de la fuente y de la carga respectivamente.

La incertidumbre mismatch es asimétrica respecto al resultado medido, esta diferencia es muchas veces insignificante en la incertidumbre total por lo que es aceptable usar el valor mayor de los dos límites.

Para la distribución U-shaped tenemos:

$$u(x_i) = \frac{20 \log(1 \pm |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|)}{\sqrt{2}} \text{ (dB)}$$

$$u(x_i) = \frac{100((1 - |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|)^2 - 1)}{\sqrt{2}} \text{ (\%)}$$

### 3.4 Ley de Propagación de Incertidumbres

La ley de propagación de Incertidumbres sigue la siguiente formula [3]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

Donde:

$u(x_i)$  : Incertidumbre individual.

$u_c(y)$  : Incertidumbre combinada.

La fórmula se aplica cuando las distintas componentes de incertidumbre son correladas.

Cuando las magnitudes de entrada son independientes entre sí, por lo que tienen sus componentes de incertidumbre incorreladas, se simplifica la formula ya que las derivadas parciales valen cero con lo que el segundo término de la ecuación anterior (3-21) se hace nulo.

$$2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = 0$$

Ley de propagación de Incertidumbres simplificada, para variables incorreladas:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=0}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

Por lo tanto, la ley de Incertidumbres simplificada queda finalmente como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=0}^n (c_i u(x_i))^2$$

$$c_i : \text{Coeficientes de sensibilidad} \Rightarrow c_i = \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$$

En los casos reales que vamos a tratar, las componentes de error van a ser siempre independientes entre sí, por lo que podremos emplear para el cálculo la Ley de propagación de Incertidumbres simplificada.

### 3.5 Teorema Central de límite

En su formulación más simple, la suma de  $n$  variables aleatorias independientes de varianza finita e idéntica distribución, tiende a la distribución normal cuando  $n$  tiende a infinito [2].

Existen otros teoremas más generales, conocidos también como teoremas centrales del límite, que no requieren que las variables sean independientes ni que las varianzas sean finitas, condición necesaria y suficiente para que el teorema sea válido. Aunque debido a Laplace y Gauss, fue demostrado rigurosamente por Alexander Lyapunov (Teorema de la Estabilidad); Además, en las últimas décadas se hicieron importantes esfuerzos en favor de su generalización.

Este teorema le confiere a la distribución normal un papel central en la teoría de la probabilidad y la teoría de las muestras.

En resumen, el teorema central de límite nos indica que cualquier combinación lineal de  $n$  variables aleatorias con distinto tipo de distribución tiende a una distribución normal, independiente del tipo de distribución de las variables.

Para que se cumpla el teorema debe verificarse que ninguna de las variables tenga mayor peso que el resto y que el número de variables  $n$  sea elevado.

### 3.6 Incertidumbre Expandida

En los certificados de calibración, según se recoge en la guía EA-4/02 y CEA-ENAC-LC/02 de expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones, la incertidumbre se ha de expresar como incertidumbre expandida de medida.

Es necesario conocer el intervalo donde es razonable suponer alta probabilidad de no equivocarse y que se encuentran los valores que pueden ser razonablemente atribuidos al mesurando.

Por ejemplo, la probabilidad de que el valor verdadero del mensurando esté comprendido en el intervalo  $(y \pm u_c)$  es bajo el 68% para el caso de la distribución normal.

Para aumentar la probabilidad hasta valores más útiles podemos multiplicar la incertidumbre combinada por un número denominado Factor de Cobertura  $k_p$ , y emplear el intervalo  $(y \pm (k_p \cdot u_c))$ .

La incertidumbre expandida será pues:

$$U_t = k_p \cdot u_c$$

$U_t$ : Incertidumbre Expandida

$k_p$ : Factor de Cobertura para un Nivel de Confianza “p”

$u_c$ : Incertidumbre Combinada

La incertidumbre típica se calcula evaluando los factores que afectan a la medida, tanto a los debidos al calibrado como al patrón empleado y las condiciones de calibración.

### **3.6.1. Cálculo de k para Distribución Normal Asumiendo el Teorema del Límite**

En los casos en los que una distribución normal puede ser atribuida a la medida, y en su incertidumbre asociada con la medida estimada, tiene suficiente fiabilidad el factor de cobertura usado para determinar la Incertidumbre Expandida que define un intervalo

de nivel de confianza “p”, utilizaremos el Factor de Cobertura propio de una distribución normal.

$$U = k \cdot \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

k=2 para un Nivel de Confianza del 95.45%

Estas condiciones se dan en la mayoría de los casos en los trabajos de calibración.

### 3.6.2. Cálculo de k para Distribución Normal en la que es posible asumir el Teorema Central del Límite

Si n (número de componentes de incertidumbre) es pequeño, el valor de  $u_A$  derivado puede ser inexacto y la distribución de la componente aleatoria es mejor representarla mediante una distribución t-Student.

El problema se resuelve empleando la fórmula de Welch-Satterthwaite, con la que se calcula el número de grados de libertad efectivos de la combinación de la distribución t-student con el número de grados de libertad encontrados.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{V_i}}$$

Donde:

$V_{eff}$  : Grados de libertad efectivos

$u_c(y)$  : Incertidumbre Combinada

$$u_i(y) = c_i u(x_i):$$

Contribuciones de Incertidumbre

$$V_i:$$

Grados de Libertad Incertidumbres Individuales

Para una incertidumbre de tipo A, los grados de libertad son  $V_i = (n-1)$

Los grados de libertad de una incertidumbre estándar tipo B se consideran  $V_i \Rightarrow \infty$ .

Por lo tanto, los grados de libertad efectivos se pueden aproximar por:

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_A^4(y)}{n-1}}$$

Y la Incertidumbre Expandida para un nivel de confianza “p” es

$$Up = k_p \cdot u_c(y)$$

Donde  $k_p$  se obtiene de la distribución t-student para los grados de libertad calculados.

A continuación se muestran los Factores de cobertura k para diferentes grados efectivos de libertad,  $V_{eff}$ , para una probabilidad de cobertura del 95,45%:

$V_{eff}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
K	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.13	2.05	2.00

Podemos ver la tabla t-student en la que se muestran los diferentes grados de libertad y las probabilidades de cobertura (tabla 3.1)

Grados de Libertad	Probabilidad de Cobertura					
	68.27	90	95	95.45	99	99.73
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
~	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

Tabla 3.1. Tabla t de student



### 3.6.3. Caso para una distribución normal no justificada.

Si una de las contribuciones de la incertidumbre es identificada como termino dominante la incertidumbre estándar puede ser escrita como:

$$u(y) = \sqrt{u_{DT}^2(y) + u_{NDT}^2(y)}$$

Con:

$u_{DT}$  : Términos dominantes

$u_{NDT}$ : Términos no-dominantes

La incertidumbre total de los términos no-dominantes

$$u_{NDT} = \sqrt{\sum_{i=2}^N u_i^2(y)}$$

No existirá término dominante si el cociente de la contribución total de la incertidumbre de los términos no-dominantes con la contribución de la incertidumbre del término dominante no es mayor de 0,3.

$$\text{Si } \frac{u_{DT}}{u_{NDT}} < 0,3 \quad \Rightarrow \quad \text{Distribución Normal}$$

Para los casos restantes la asunción de una distribución normal no está justificada, por lo que no es posible aplicar el teorema de la central del límite, así que la información de la estimación de la salida se debe utilizar para obtener un valor del factor k de la cobertura, que corresponde a una probabilidad de la cobertura de aproximadamente el 95%.

$$\text{Si } \frac{u_{DT}}{u_{NDT}} > 0,3 \Rightarrow \text{Distribución Dominante}$$

### 3.6.3.1. Una de las contribuciones de la incertidumbre se puede identificar como Término Dominante

Bajo estos supuestos la distribución de los valores que se podrían razonablemente atribuir al mensurado es esencialmente idéntica a de distribución dominante sabida. De la densidad de distribución dominante  $f(y)$  la probabilidad “p” de cobertura se puede determinar para cualquier valor de incertidumbre expandida U mediante la integral:

$$p(U) = \int_{y-U}^{y+U} f(y) dy$$

El factor de la cobertura se puede finalmente expresar como:

$$k(p) = \frac{U(p)}{u(y)}$$

Como el ejemplo nosotros suponemos una distribución rectangular, como muestra la figura 3.9:

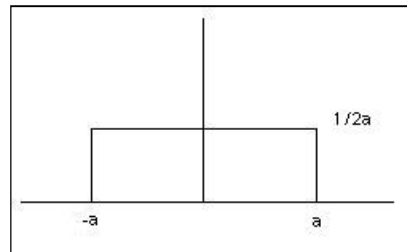


Figura 3.9. Distribución Rectangular

Resolviendo esta relación para la incertidumbre expandida  $U$  e insertando el resultado junto con la expresión de la incertidumbre estándar de la medida con una distribución rectangular tendremos:

$$p(U) = \int_{y-U}^{y+U} f(y) dy = \int_{y-U}^{y+U} \frac{1}{2a} dy = \frac{y+U - (y-U)}{2a} = \frac{U}{a}$$

$$u(y)^2 = \int_{-a}^a (x - \bar{x})^2 f(x) dx = 2 \int_{-a}^a x^2 f(x) dx =$$

$$u(y)^2 = 2 \int_0^a x^2 \frac{1}{2a} dx = 2 \frac{1}{2a} \int_0^a x^2 dx = \frac{1}{a} \left[ \frac{x^3}{3} \right] = \frac{a^2}{3}$$

Finalmente nos da la relación:

$$u(y) = \frac{a}{\sqrt{3}} \Rightarrow k(p) = \frac{U(p)}{u(y)} = \frac{p \cdot a}{\frac{a}{\sqrt{3}}} = p \cdot \sqrt{3}$$

Y para una probabilidad el  $p=95\%$  de la cobertura, así que el factor relevante  $k$  está:

$$k(p) = 0.95 * \sqrt{3} = 1.64544 \cong 1.65$$

$$U = 1.645 * u(y)$$

### 3.6.3.2. Dos de las contribuciones de la Incertidumbre se pueden identificar como Términos Dominantes

Si la situación de la medida es tal que dos de las contribuciones de la incertidumbre se pueden identificar como términos dominantes, el método se puede aplicar con las dos contribuciones dominantes.

$$u(y) = \sqrt{u_{DT}^2(y) + u_{NDT}^2(y)}$$

donde:

$$u_{DT}(y) = \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y)}$$

La contribución combinada de los dos términos dominantes y la contribución total de la incertidumbre de los términos no-dominantes restantes:

$$u_{NDT}(y) = \sqrt{\sum_{i=3}^N u_i^2(y)}$$

Si las dos contribuciones dominantes son distribuciones rectangulares, la distribución resultante es la convolución de ambas, una distribución rectangular con semi-amplitud

$a_1 = a(1 + \beta)/2$  y otra con semi-amplitud  $a_1 = a(1 - \beta)/2$  da una distribución trapezoidal simétrica, como se muestra en la figura 3.10.

$$f(z) = f_1 * f_2 = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) \cdot f_2(z-t) \cdot dt$$

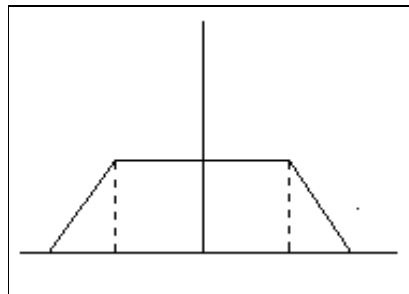


Figura 3.10. Trapezoidal Simétrica

Con las medias anchuras de la base y de la tapa respectivamente

Dónde:  $a = a_1 + a_2$       y       $b = |a_1 - a_2|$

La densidad de distribución se puede expresar de la forma:

$$f(y) = \frac{1}{a(1 + \beta)} \times \begin{cases} 1 & |y| < \beta \cdot a \\ \frac{1}{1 - \beta} \left( 1 - \frac{|y|}{a} \right) & \beta \cdot a \leq |y| \leq a \\ 0 & a < |y| \end{cases}$$

Con el parámetro “edge”:

$$\beta = \frac{b}{a} = \frac{|a_1 - a_2|}{a_1 + a_2}$$

El cuadrado de la incertidumbre estándar de la medida deducida de la distribución trapezoidal es:

$$u^2(y) = \frac{a^2}{6} (1 + \beta^2)$$

De esta densidad de la distribución  $f(y)$  la probabilidad de cobertura  $p$  puede ser determinada para cualquier valor de la incertidumbre ampliada  $U$  mediante la integral:

$$p(U) = \int_{y-U}^{y+U} f(y) dy$$

Haciendo esta integración podemos obtener el valor de la incertidumbre ampliada  $U=U(p)$  para la densidad dada de la distribución  $f(y)$ . Usando esta relación, finalmente el factor de la cobertura se puede expresar como:

$$k(p) = \frac{U(p)}{U(y)}$$

Así pues, la probabilidad de la cobertura obtenida según este método es:

$$k(p) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}} \begin{cases} 1 - \sqrt{(1-p)(1-\beta^2)} & \text{si } \beta \leq \frac{p}{2-p} \\ \frac{p(1+\beta)}{2} & \text{si } \beta > \frac{p}{2-p} \end{cases}$$

El factor de la cobertura para una probabilidad de cobertura del 95% apropiado a una distribución trapezoidal con un parámetro del borde de  $\beta < 0.95$  se calcula de la relación:

$$k(p) = \frac{1 - \sqrt{(1-p)(1-\beta^2)}}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}}$$

k estará comprendido entre 1,645 y 1,9; la Incertidumbre expandida quedará:

$$U = k * u(y)$$

### 3.7 Expresión de la incertidumbre de medida en los certificados de calibración

En los certificados de calibración, el resultado completo de la medición, que consiste en el estimado y del mesurando, y la incertidumbre expandida asociada  $U$  debe expresarse en la forma  $(y \pm U)$ .

También debe incluirse una nota aclarativa en la que se explique lo siguiente:

“La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura  $k=2$  que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA-4/02.”

Sin embargo, si se ha seguido un procedimiento donde no se cumple el teorema central del límite, la nota aclarativa debe contener:

“La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medida por el factor de cobertura  $k = XX$  que, para una distribución de  $t$  de Student con  $V_{ef} = YY$  grados efectivos de libertad, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medición se ha determinado conforme al documento EA-4/02.”

El valor numérico de la incertidumbre de medida debe expresarse, como máximo, con dos cifras significativas.

En general, el valor numérico del resultado de la medición debe redondearse en su expresión final a la menor cifra significativa en el valor de la incertidumbre expandida asignada al resultado de la medición.

Para el proceso de redondeo, deben aplicarse las normas habituales para el redondeo de cifras. No obstante, si el redondeo reduce el valor numérico de la incertidumbre de medición en más de un 5%, debe utilizarse el valor redondeado hacia arriba.



# Capítulo 4. Analizadores de Espectros. Evolución y Comparativa.

---

## 4.1 El Analizador de Espectros

Un analizador de espectros es una herramienta capaz de representar una señal eléctrica en el dominio de la frecuencia, y separa las señales en sus componentes base (sinusoidales).

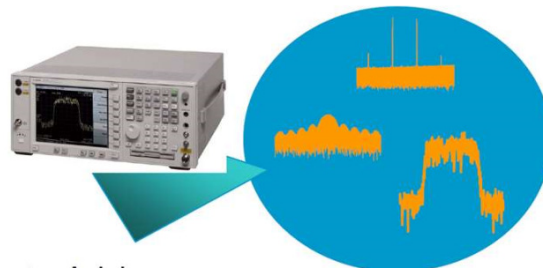


Figura 4.1. Analizador de Espectros

Esta representación permite visualizar parámetros de la señal que difícilmente podrían ser descubiertos trabajando en el dominio del tiempo con ayuda de un osciloscopio.

Es especialmente útil para medir la respuesta en frecuencia de equipos de telecomunicaciones (amplificadores, filtros, acopladores, etc.) y para comprobar el espectro radioeléctrico en una zona determinada con la ayuda de una antena. En la figura 4.1 se muestra un analizador de espectros junto con algunas de las visualizaciones más típicas.

En la pantalla del equipo la amplitud o potencia de las señales se representa en el eje y, mientras que la frecuencia se representa en el eje x. La medida de potencia viene indicada en dBm, una unidad logarítmica relativa al mw:

$$P(\text{dBm})=10\log(P(\text{mw}))$$

Se denomina frecuencia central del analizador a la que corresponde con la frecuencia en el punto medio de la pantalla. Más adelante estudiaremos qué significa esto exactamente.

Hay diferentes tipos de medida que pueden hacerse con el analizador de espectros. Las tres más comunes son medidas de modulación, medidas de distorsión y medidas de ruido (figura 4.2).

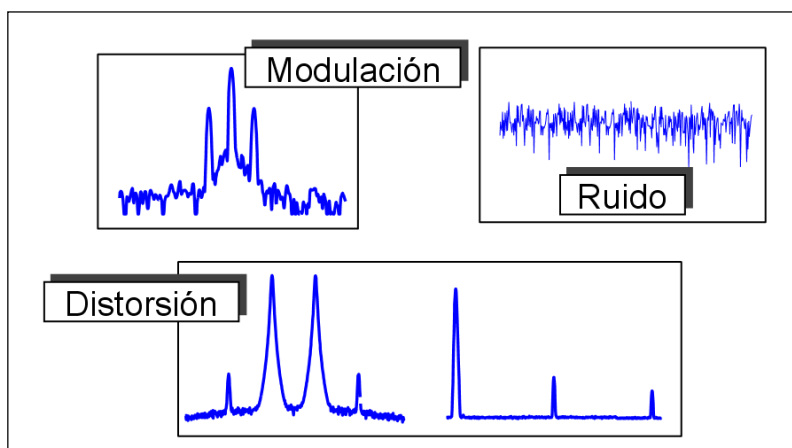


Figura 4.2. Aspectos de los tipos de medida

## 4.2 Frecuencia vs. Tiempo

Tradicionalmente, si observamos una señal eléctrica, se utiliza un osciloscopio para ver cómo la señal varía con tiempo. Sin embargo, ésta información no es completa. Para entender completamente el funcionamiento de un dispositivo y/o sistema, es necesario

también analizar las señales en el dominio de la frecuencia. En la representación gráfica de la figura 4.3, se representa la amplitud de la señal en función de frecuencia.

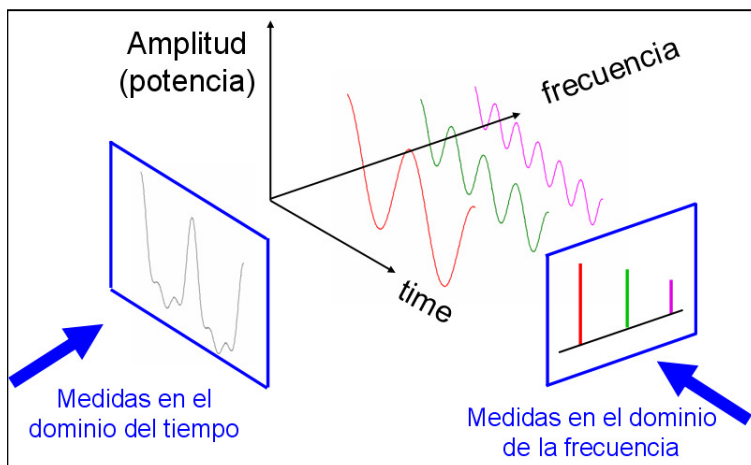


Figura 4.3. Dominios del tiempo, frecuencia y amplitud

El analizador de espectro es al dominio de la frecuencia como el osciloscopio es al dominio de tiempo. Es importante comentar que los analizadores de espectro se pueden también utilizar en el modo “zero span” para proporcionar capacidad de medida en el dominio del tiempo, como la de un osciloscopio

En el dominio del tiempo, todas las componentes de frecuencia de la señal se suman y se representan a la vez. En el dominio de la frecuencia, se muestran las señales complejas (es decir, señales formadas por más de una frecuencia) separadas en sus componentes espectrales, y su nivel para cada frecuencia.

Las medidas del dominio de la frecuencia tienen varias ventajas que no ofrece el dominio del tiempo. Por ejemplo, tenemos una señal en un osciloscopio que aparenta ser una onda pura del seno. Como sabemos, una onda sinusoidal pura no tiene ninguna distorsión armónica en teoría. Si se analiza la señal en un analizador de espectro, se observa que la señal está compuesta realmente de varias frecuencias. Esto, que no era perceptible en el osciloscopio, llega a ser muy evidente en el analizador de espectro.

Algunos sistemas son intrínsecamente orientados al dominio de la frecuencia. Por ejemplo, los sistemas de telecomunicaciones llamados de acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA) o multiplexación por división de frecuencia (FDM). En estos sistemas, se asignan a diversos usuarios diversas frecuencias para transmitir y recibir, por ejemplo con un teléfono móvil. Las estaciones de radio también utilizan FDM, cada estación en un área geográfica dada ocupa una banda de frecuencia particular. Estos tipos de sistemas se deben analizar en el dominio de la frecuencia para cerciorarse de que nadie está interfiriendo con los usuarios o con las estaciones de radio con frecuencias vecinas.

De una simple mirada al espectro de una señal, las medidas de frecuencia, potencia, armónicos, modulación, espurios, y ruido pueden ser hechas fácilmente. Dada la capacidad para medir estos valores, se puede determinar la distorsión armónica total, el ancho de banda ocupado, la estabilidad de la señal, la distorsión de potencia de salida, la intermodulación, la anchura de banda de la energía y el cociente portadora-ruido (C/N), usando simplemente un analizador de espectro.

### 4.3 Clasificación de los Analizadores de Espectros

Vamos a clasificar en dos las maneras de hacer las medidas del dominio de la frecuencia: Transformada de Fourier y barrido-sintonizado.

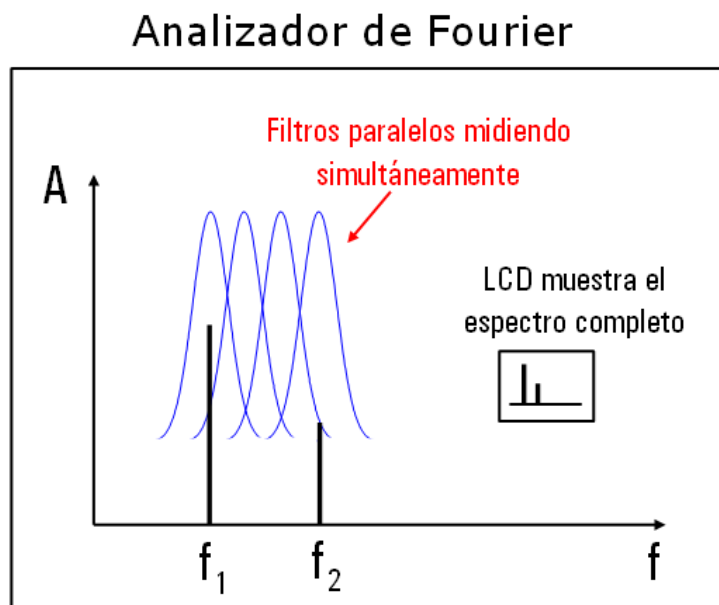


Figura 4.4. Analizador de Fourier

El **analizador de Fourier** toma básicamente una señal del dominio del tiempo, la convierte a digital muestreándola, realiza las matemáticas requeridas para convertirlas al dominio de la frecuencia, y exhibe el espectro que resulta. Es como si el analizador estuviera mirando la gama de frecuencia entera al mismo tiempo que usa unos filtros paralelos que miden simultáneamente (figura 4.4)

Está capturando realmente la información del dominio de tiempo y contiene toda la información de la frecuencia. Gracias a la capacidad de análisis de la señal en tiempo real, el analizador de Fourier puede capturar señales periódicas así como acontecimientos al azar y transitorios.

Sin embargo tiene sus limitaciones, particularmente en las áreas del rango de frecuencia, de la sensibilidad, y del rango dinámico. Los analizadores de Fourier están obsoletos

El tipo más común de analizador de espectro es el **receptor barrido-sintonizado**.

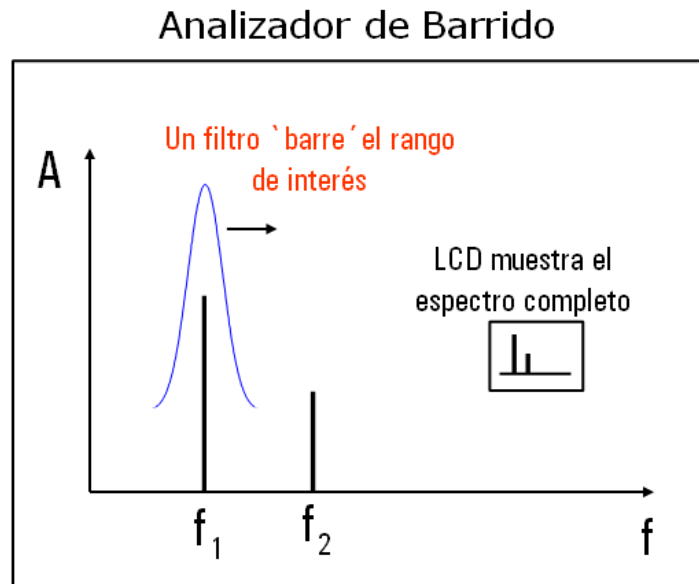


Figura 4.5. Analizador de Barrido

Estos analizadores barren todo el rango de frecuencia de interés, mostrando todas las componentes de frecuencia presentes (figura 4.5). En secciones posteriores se explicará cómo se consigue realizar este barrido realmente.

El analizador barrido-sintonizado trabaja como la radio; con la radio sintonizamos frecuencias mediante un filtro y escuchamos el contenido mediante el altavoz, el analizador de espectros hace un barrido sintonizando la frecuencia y muestra el nivel de potencia que recibe por pantalla.

La técnica de barrido del receptor permite que las medidas del dominio de la frecuencia sean de mayor rango dinámico así como de mayor ancho de banda y mejora en la medición del ruido de fondo.

## 4.4 Teoría de funcionamiento

Existen gran variedad de analizadores de espectros en el mercado de mayor o menor complejidad, la figura 4.6 muestra la foto de un analizador de espectros Keysight, de la familia ESA. Todos los analizadores de espectros comparten una serie de características comunes, de las que es necesario estar familiarizado antes de su utilización, sea el analizador que sea, antigüedad y modelo.

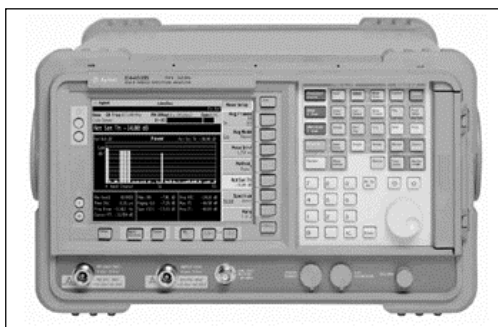


Figura 4.6. Analizador de espectros. Familia ESA.

Como hemos comentado anteriormente, la idea general del funcionamiento del analizador de espectros de barrido sintonizado, es que existe un filtro que barre las frecuencias de interés e irá mostrando en pantalla las distintas componentes que nuestra señal a analizar tiene en cada frecuencia. Este concepto tan sencillo, en la práctica sería muy complicado y costoso de realizar, ya que necesitaríamos un filtro que actuase en un amplio rango de frecuencias. En la práctica, se emplea un filtro paso banda constante, en el que se hace es batir nuestra señal de entrada con un oscilador local sintonizado mediante un mezclador, esto es más fácil de realizar y conlleva un coste mucho menor.

En la siguiente página, tenemos el diagrama de bloques tipo de un analizador espectros de barrido sintonizado (fig 4.7). A la luz de la figura, se observa que los componentes principales son: atenuador de la entrada de RF, mezclador, amplificador de IF (frecuencia intermedia), filtro de IF, detector, el filtro de video, oscilador local, generador de barrido y el display LCD.

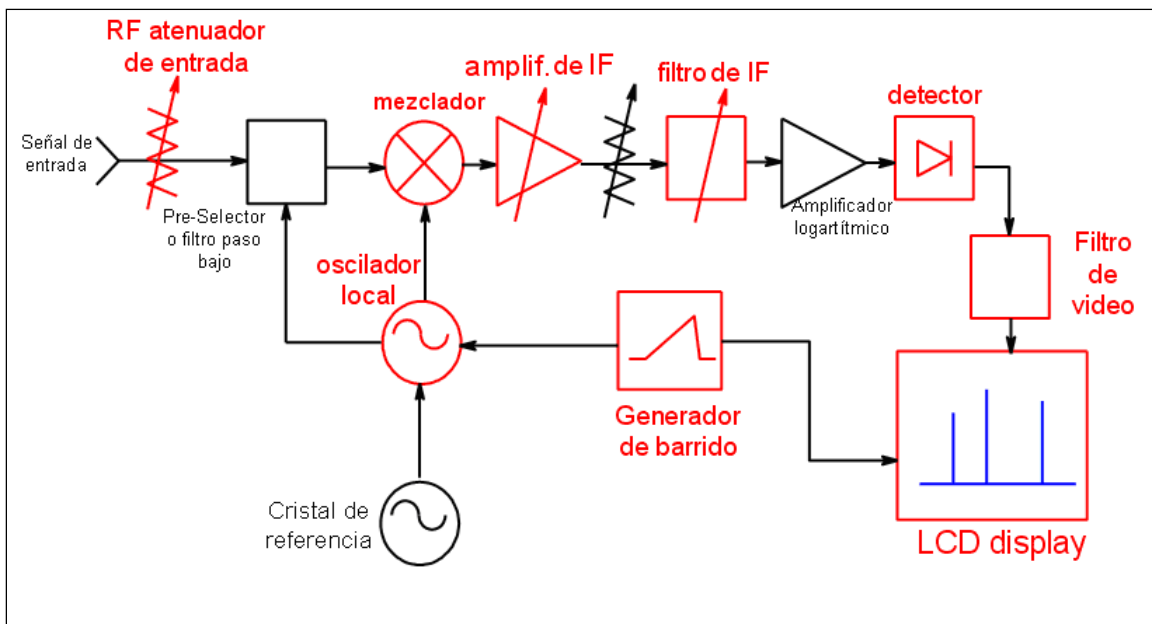


Figura 4.7. Funcionamiento. Diagrama de bloques.

#### 4.4.2. Mezclador

Un mezclador es un dispositivo de tres puertos que convierte una señal de entrada, a una frecuencia determinada, a otra frecuencia distinta, como se muestra en la figura 4.8. Hay que tener en cuenta que un mezclador es un dispositivo no lineal, por lo que a su salida, habrá frecuencias que no existían a las entradas.

Esto es posible de la siguiente manera: Aplicamos la señal de entrada al puerto de entrada del mezclador, y una señal de un oscilador local (LO, por su acrónimo en inglés) al otro puerto de entrada.

Las frecuencias que serán producidas por el mezclador a la salida son las frecuencias de entrada originales (RF y LO), más las frecuencias de la suma y de la diferencia de ambas (ver figura 4.9).



El analizador de espectros utiliza la frecuencia diferencia. A esta señal se le denomina señal IF o señal de frecuencia intermedia.

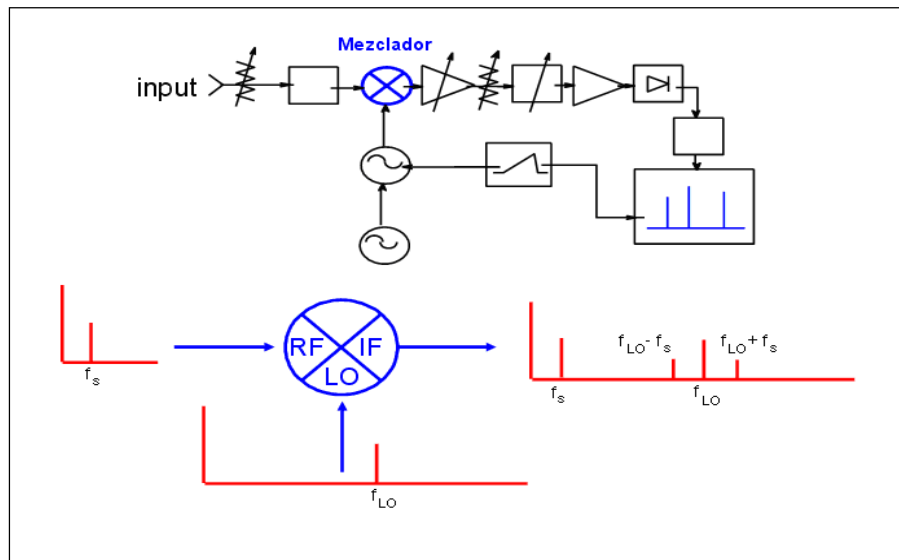


Figura 4.8. Mezclador

### 4.4.3. Filtro de IF

El filtro de IF es el filtro paso banda que se utiliza para seleccionar y detectar la señal que nos interesa, a la salida del mezclador. A este ancho de banda es lo que conocemos como ventana de resolución (RBW, del inglés “Resolution Bandwidth”) del analizador de espectros.

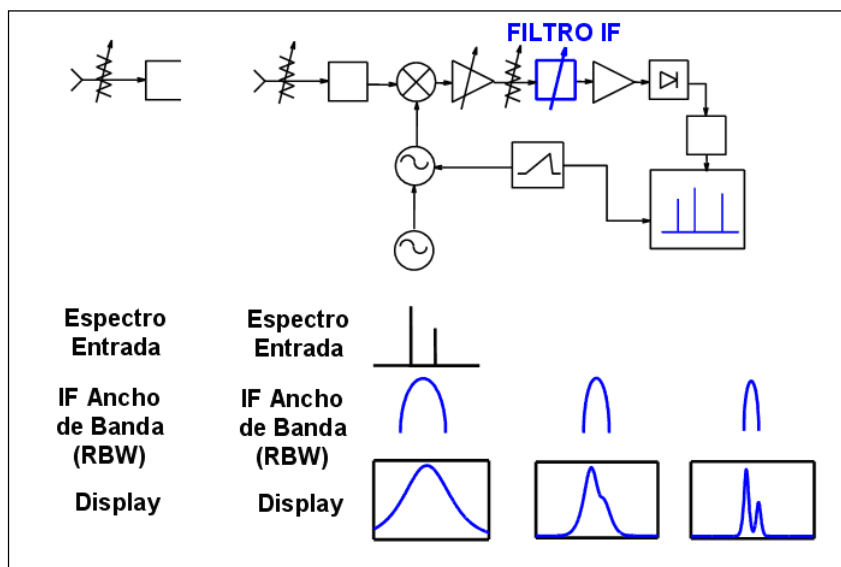


Figura 4.9. Filtro IF

El RBW se debe variar para que el instrumento pueda optimizar las condiciones del barrido de la señal. Mientras menor sea el ancho de banda del filtro de resolución tendremos mayor resolución, luego mayor selectividad en frecuencia.

Podemos ver de la figura 4.9 como se mejora la señal de salida a medida que se elige un RBW más estrecho, al tener mayor selectividad.

La velocidad de barrido y la de muestreo están relacionadas por el RBW. El ajuste del grado óptimo de RBW depende principalmente de las características de las señales a tratar.

#### 4.4.4. Detector

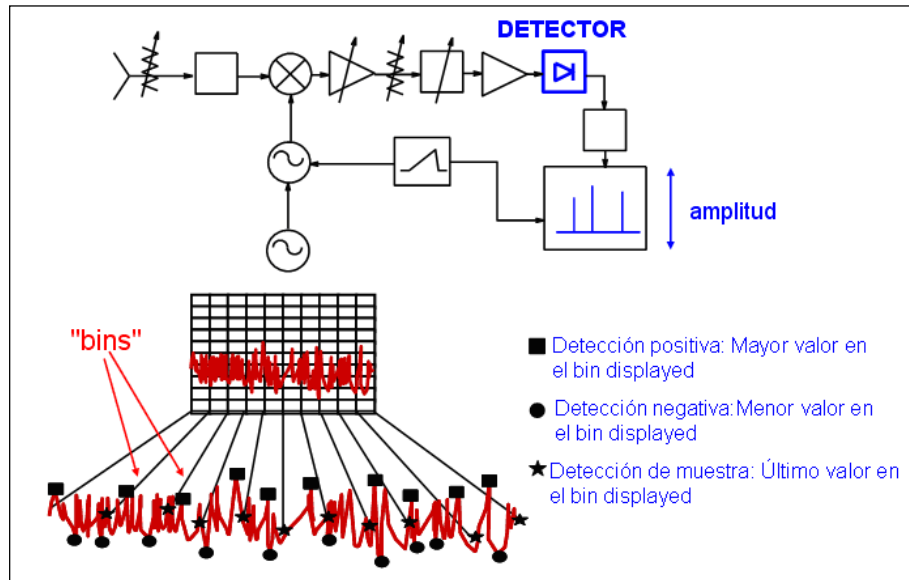


Figura 4.10. Detector de Evolvente

El detector es quien convierte la señal de IF a banda base o señal de video y así puede ser vista en el display del instrumento. Esto se logra con un detector de envolvente que luego va a unas placas deflectoras que controlan el eje 'y' del display LCD. El generador de barrido controla el eje 'x'.

Los analizadores modernos tienen un display digital, con lo que primero se digitaliza la señal de video con un convertidor analógico-digital (ADC). La salida convertida a digital en el ADC se representa como la amplitud de la señal en el eje 'y' del display. (fig 4.10).

Existen diversos modos de detección de los bins que se representarán en el display.

En modo de detección positiva, se toma el valor máximo de la señal en los distintos intervalos de tiempo de los que está formado el barrido (bins), mientras que en el modo

negativo toma el valor mínimo. El modo detección positiva se utiliza típicamente al analizar sinusoides, pero no es bueno para mostrar ruido, puesto que no demuestra la aleatoriedad verdadera del ruido.

En la detección de muestra, se toma un valor al azar para cada intervalo. Esto es la mejor para mirar ruido o las señales de la misma naturaleza, ya que son señales que varían de forma aleatoria.

#### 4.4.5. Filtro de Video

El filtro video es un filtro paso bajo que está situado después del detector y antes del ADC. Se utiliza para hacer un promedio o suavizar la traza vista en la pantalla.

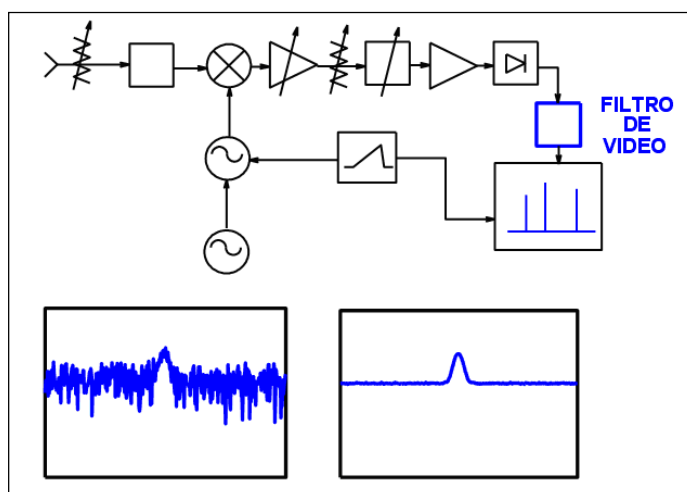


Figura 4.11. Filtro de video

Cuando se observa una señal cuyo nivel es muy cercano al ruido queda enmascarada por el propio ruido. Cambiando el ajuste del ancho de banda del video (VBW), podemos disminuir las variaciones de pico a pico del ruido. Esta forma de suavizar la traza de la señal se puede utilizar para ayudar a encontrar las señales están enmascaradas entre el ruido. En la figura 4.11 se muestra una señal antes y después de ajustar el filtro de video.

#### 4.4.6. Otros Componentes

##### 1. Oscilador local (LO)

Es un oscilador controlado por tensión (VCO). El generador de barrido sintoniza realmente el LO de modo que su frecuencia cambie en la proporción al voltaje de la rampa.

El muestreo de la señal video por el ADC también se sincroniza con el generador de barrido para crear el dominio de la frecuencia en el eje\_x. Puesto que la relación entre el oscilador local y la señal de entrada se sabe, el eje horizontal del display se puede calibrar a la frecuencia de la señal de entrada.

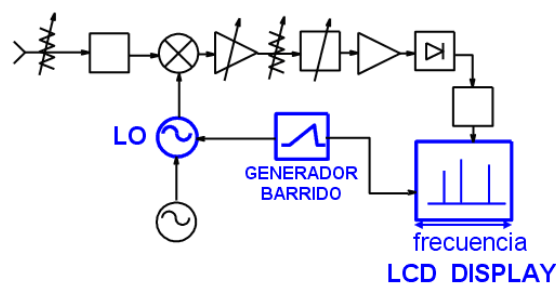


Figura 4.12. Diagrama de bloques: el LO, el generador de barrido y el display

##### 2. Atenuador de Entrada RF

El atenuador de la etapa de entrada del analizador es un atenuador de pasos situado entre el conector de la entrada y el primer mezclador. También se llama el atenuador de RF. Se utiliza para ajustar el nivel de la señal que incide sobre el primer mezclador. Esto es importante para prevenir la compresión y la distorsión del mezclador debido a señales de alto nivel y/o de banda ancha.

##### 3. Amplificador de IF

Está situado después del mezclador pero antes del filtro de IF o del RBW. Se utiliza para ajustar la posición vertical de señales respecto al display sin afectar

el nivel de la señal en la entrada del mezclador. Cuando cambia el atenuador de entrada no queremos que nuestro nivel de referencia cambie, por lo que si atenúamos la señal a la entrada el amplificador la amplifica con igual ganancia que se atenuó.

Estos dos componentes van apareados de forma que en la pantalla siempre veremos el valor adecuado de señal.

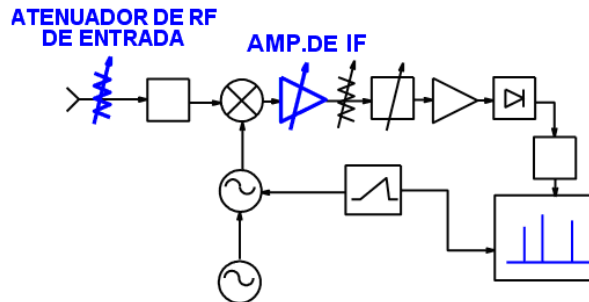


Figura 4.13. Diagrama de bloques: Atenuado de entrada y amplificador IF

#### 4.4.6.2. Funcionamiento completo

La señal que interesa medir está conectada a la entrada del analizador. A continuación se bate con el LO a través del mezclador y se convierte a una señal de IF a la que el sistema está diseñado para operar.

La señal resultante se envía al filtro de IF, cuya salida es detectada, indicando la presencia de una señal a la frecuencia sintonizada del analizador. El voltaje de la salida del detector conduce el eje vertical (amplitud) del LCD display.

El generador de barrido proporciona la sincronización entre el eje horizontal (frecuencia) y consigue sintonizar a la frecuencia IF todo el espectro de la señal de entrada en el rango de medida.

La salida que resulta muestra la amplitud en función de la frecuencia de cada componente espectral de señal entrante.

El atenuador RF, el amplificador de IF y el filtro de video son importantes pero no críticos en la descripción de cómo trabaja el analizador de espectros.

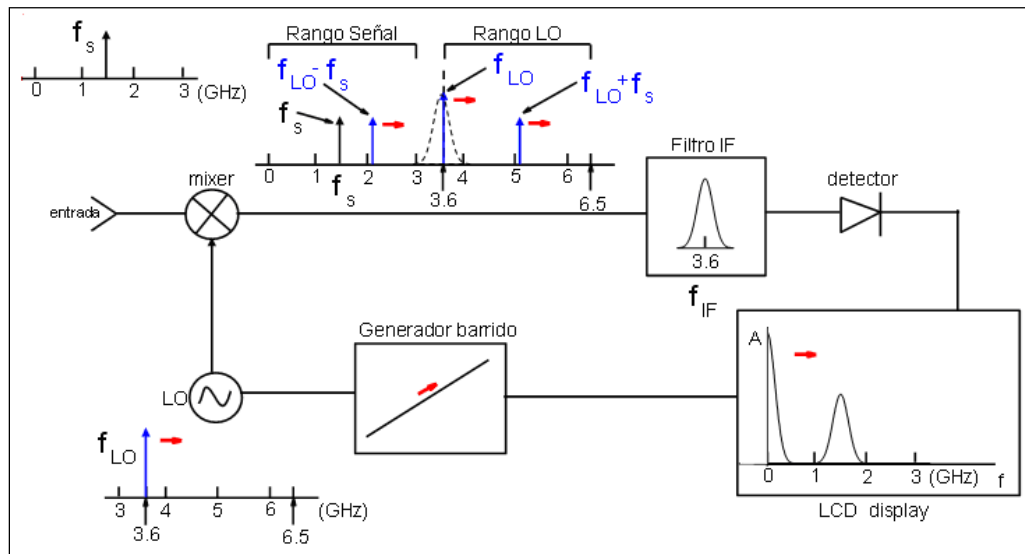


Figura 4.14. Funcionamiento

#### 4.4.7. Analizador de Espectros en la actualidad

Los analizadores de espectros modernos no tienen los mismos componentes que el diagrama de bloques visto. Realizan las mismas operaciones pero han cambiado. Los avances en ADC y la tecnología DSP no sólo han beneficiado a los analizadores FFT sino que ha hecho a los analizadores de barrido más potentes.

La figura 4.15 muestra el diagrama de bloques de un analizador de espectros actual.

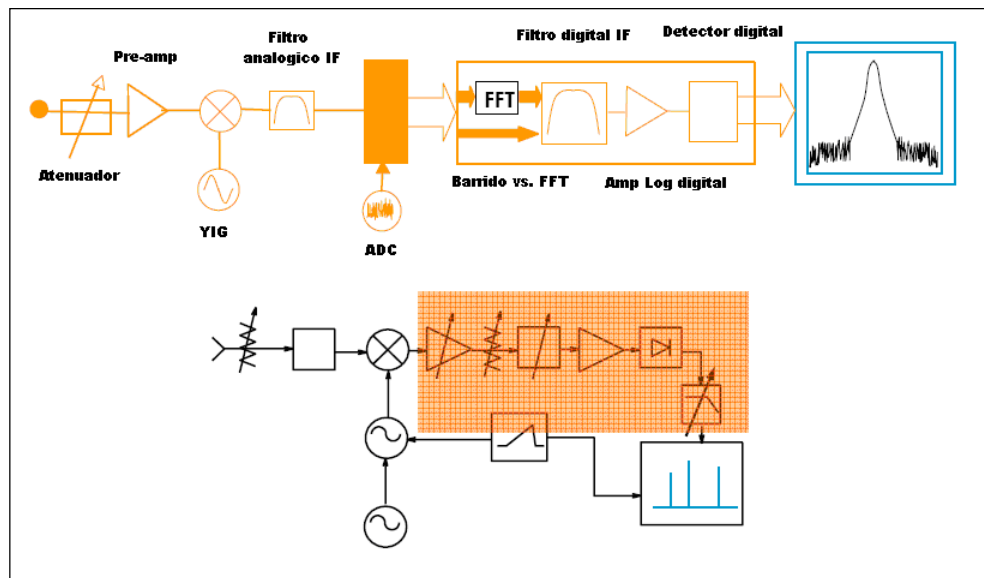


Figura 4.15. Gráfico comparación

La gran diferencia existente es que integran mejores convertidores ADC que realizan el cambio a digital y opera con los datos digitales, por lo que los componentes ahora serán digitales. La consecuencia es que con el procesamiento de la señal digitalmente, se obtienen ventajas de precisión, rango dinámico y velocidad.

Éstos analizadores son capaces de integrar gracias al procesado digital el funcionamiento tanto como analizador FFT como analizador de barrido sintonizado. Así, si necesitamos una medida de alto rango dinámico usaremos el analizador en modo barrido sintonizado y si lo que se necesita es un barrido de banda estrecha rápido lo utilizaremos en modo FFT.

En un analizador de espectros moderno (digital):

- El preamplificador de la etapa de entrada cubre todas las bandas de frecuencia del analizador.
- El LO sintetizado digitalmente presenta ventajas en cuanto a la rapidez de sintonización y menor ruido de fase.



- Los filtros digitales de IF son muchísimo mejores en cuanto a resolución y tienen un mucho menor error de conmutación, además de un menor ruido.
- El amplificador digital logarítmico tiene un mayor rango dinámico y un menor error de fidelidad de escala, así como menor error de nivel de referencia.

## 4.5 Especificaciones, Precisión (frecuencia y Amplitud)

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, tenemos que los siguientes componentes del analizador son los que van a contribuir a la incertidumbre en medidas de amplitud: Impedancia de entrada (desadaptación de entrada), atenuador de entrada (incertidumbre de conmutación), mezclador y filtro de entrada (respuesta en frecuencia), amplificador y filtro de IF, y filtros de resolución (incertidumbre de conmutación de filtro RBW).

La expresión general empleada para calcular el máximo error de desadaptación en dB es:

$$\text{Error (dB)} = -20 \log[1 \pm (p_{\text{analyzer}})(p_{\text{source}})]$$

Donde  $p$  es el coeficiente de reflexión de entrada:

$$p = \frac{(VSWR-1)}{(VSWR+1)}$$

En la siguiente tabla tenemos unas contribuciones tipo de los factores clave que contribuirán a la incertidumbre en amplitud (tabla 4.1). Por supuesto, en el siguiente capítulo se demostrará el cálculo de incertidumbre de alguno de éstos puntos. La tabla nos da una idea de la incertidumbre típica para comprobar la mejora de los antiguos analizadores a los modernos digitales.

<b>Amplitud Relativa y Absoluta</b>	<b>Incertidumbre tipo</b>
Desadaptación de Entrada	$\pm 0.13$ dB
Conmutación del Amplificador de Entrada	$\pm 0.60$ dB
Respuesta en Frecuencia	$\pm 1.80$ dB
Precisión del nivel de Referencia	$\pm 1.00$ dB
Conmutación de RBW	$\pm 0.50$ dB
Fidelidad de Escala	$\pm 0.85$ dB

Tabla 4.1. Incertidumbres tipo de fuentes de error

La implementación digital reduce o elimina:

- Incertidumbre de cambio de escala del display
- Incertidumbre del nivel de referencia.
- Incertidumbre de fidelidad de escala.
- Incertidumbre por conmutación del RBW

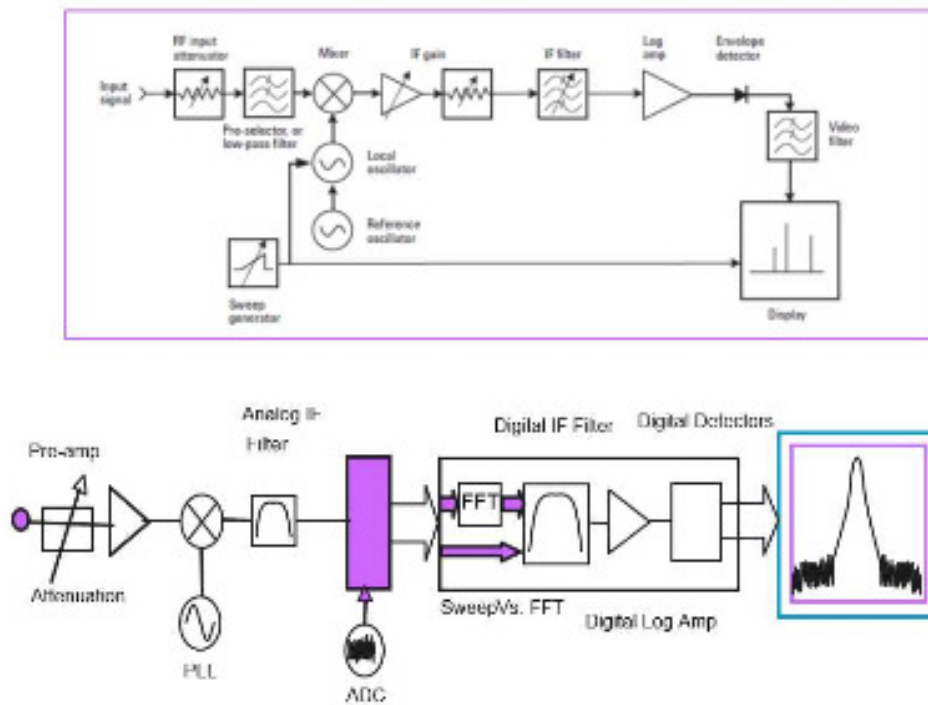


Figura 4.16. Comparativa Analógico / digital

Cuando se habla de Amplitud Absoluta, se está refiriendo a la potencia o el nivel de una señal, por ejemplo, al medir el nivel de una portadora en dBm.

Por el contrario, cuando se habla de amplitud relativa, se está refiriendo a la diferencia entre dos niveles, típicamente expresado en dB. Las medidas relativas usan una señal (o un componente de una señal) como referencia. Por ejemplo, si medimos distorsión armónica, empleamos el armónico fundamental como referencia, y los armónicos son típicamente medidos en dBc.

## 4.6 Factores de incertidumbre de amplitud en un analizador de espectros de la familia ESA.

### 4.6.1. Incertidumbre relativa

Cuando se realizan medidas relativas de una señal, se utiliza o alguna parte de la propia señal de entrada o una diferente como señal de referencia. Por ejemplo, cuando se quiere obtener la medida de la distorsión del segundo armónico, se emplea el primer armónico o fundamental como referencia. No intervienen para nada medidas de nivel absoluto, únicamente interesa averiguar cuánto difiere el segundo armónico respecto de la fundamental.

En el peor caso de medidas relativas, puede suceder que la fundamental se encuentre en un punto de frecuencia donde la respuesta en frecuencia sea máxima, mientras que el armónico a medir esté en un punto de frecuencia donde la respuesta en frecuencia sea mínima. El caso contrario es igualmente probable.

Por lo tanto, en la respuesta en frecuencia relativa, la especificación de  $\pm 0.5$  dB incluye la suma de la incertidumbre de flatness de las dos bandas de frecuencia (figura 4.17)

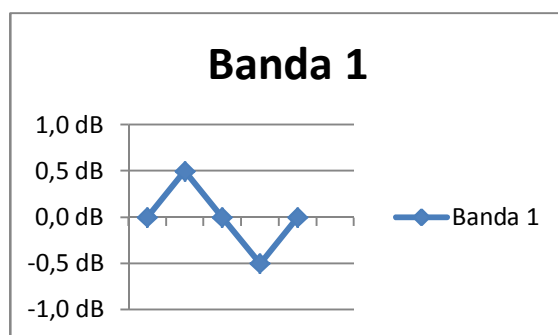


Figura 4.17. Ejemplo incertidumbre relativa

Otras incertidumbres se consideran irrelevantes en medidas relativas como la incertidumbre por conmutación de RBW o la precisión del nivel de referencia, que

aplicaría a ambas señales (fundamental y armónico), como se va a estudiar más adelante.

#### **4.6.2. Incertidumbre de amplitud absoluta**

Prácticamente la totalidad d los analizadores de espectros tienen un calibrador integrado que genera una señal de referencia de un nivel conocido a una frecuencia conocida.

Por lo tanto se puede confiar en la precisión del analizador para trasladar la calibración de nivel absoluto de referencia a otras frecuencias y amplitudes. Por este motivo, muchos analizadores de espectros incluyen en sus especificaciones de respuesta en frecuencia absoluta.

#### **4.6.3. Factores de incertidumbre en amplitudes relativas**

##### **4.6.3.1. Respuesta en Frecuencia (Flatness)**

A menudo es el mayor contribuyente individual a la incertidumbre. Es dependiente del flatness del atenuador de entrada, las pérdidas de conversión en el mezclador (mixer) y el flatness del preselector (en caso de ser aplicable). La respuesta en frecuencia afecta a la amplitud medida por el analizador de señales a diferentes frecuencias.

Generalmente, el error de la respuesta en frecuencia está especificado tanto para medidas relativas como absolutas (que tiende a ser menor que la relativa)

Para obtener la incertidumbre de la respuesta en frecuencia para medidas relativas, la especificación de la respuesta en frecuencia debe ser doblada (multiplicada por dos) para reflejar la respuesta en frecuencia pico a pico. Ésta respuesta pico a pico suele ser mayor que las especificaciones de respuesta en frecuencia absoluta.

Cuando se hacen medidas relativas de señales en diferentes bandas, se debe añadir el error de respuesta en frecuencia de cada banda para determinar la incertidumbre total.

#### **4.6.3.2. Conmutación de banda**

Cuando se miden señales en diferentes bandas de frecuencia, surgen incertidumbres añadidas cuando el analizador cambia de una banda a otra.

Para saber si la medida a tratar está afectada por esto, se debe consultar las especificaciones del analizador y comprobar los diferentes rangos de frecuencia para cada banda.

#### **4.6.3.3. Fidelidad de Escala**

La incertidumbre de fidelidad de escala aplica cuando una señal en una posición vertical del display es medida respecto a otra señal en una posición vertical diferente.

La manera más común de mostrar señales en un analizador de espectros es usando una amplitud de escala logarítmica, como 10 dB por división de grátícula o 1 dB por división. Por lo tanto, la señal de IF generalmente pasa por un amplificador logarítmico. La curva característica de ganancia del amplificador se aproxima a una curva logarítmica, por lo que cualquier desviación de una curva perfecta logarítmica en la respuesta se añade a la incertidumbre de amplitud.

De manera similar, cuando el analizador está en modo lineal, los amplificadores lineales no tienen una respuesta perfecta.

La arquitectura de IF digital no incluye un amplificador logarítmico. En lugar de ello, la función logarítmica se hace matemáticamente de manera digital.

#### 4.6.3.4. Nivel de referencia

La amplitud representada por la línea superior de la grátícula es el nivel de referencia. Es dependiente del atenuador de entrada y la ganancia de IF.

La incertidumbre es la cantidad de ganancia de IF en una configuración de nivel de referencia particular que afecta a la precisión de la amplitud del nivel de referencia. Cualquier cambio en el control del nivel de referencia introduce incertidumbre.

Después de que la señal de entrada es convertida a IF a través del mezclador, ésta pasa por el amplificador de IF y el atenuador de IF que se ajustan para compensar los cambios en el atenuador de entrada y las pérdidas en la conversión del mezclador.

La señal de entrada es entonces referenciada a la línea superior de la grátícula del display, que es como hemos explicado, el nivel de referencia.

Los analizadores de espectros con toda la parte de IF digitalizada, como los ESA que estamos estudiando, no tienen incertidumbre de ganancia de IF que cambie con el nivel de referencia, por lo que no existe incertidumbre de ganancia IF. Esto es porque el nivel de referencia afecta únicamente al display, no a la medida, por lo que no causa errores adicionales en los resultados de medida.

#### 4.6.3.5. Conmutación del Atenuador de Entrada

La atenuación de entrada tiene una incertidumbre inherente que reduce la precisión del nivel de referencia únicamente si se cambia el setting del atenuador entre el nivel de referencia y la medida.

Esto aplica porque en ocasiones las medidas relativas se toman con diferentes configuraciones (valores) del atenuador de entrada. En estos casos se debe considerar el error por conmutación del atenuador de entrada. Debido a que el atenuador de

entrada opera para todas las bandas de frecuencia del analizador, el valor de aquel caría con la frecuencia.

#### **4.6.3.6. Resolución del Ancho de Banda (RBW)**

Diferentes configuraciones del RBW tienen diferentes pérdidas de inserción. Esto puede causar cambios en la amplitud mostrada por el analizador cuando una señal es medida con diferente RBW.

Cambios en la configuración del ancho de banda entre medidas de amplitud disminuye la precisión. La parte digital de IF en el ESA incluye un pre-filtro analógico configurado a 2.5 veces el RBW deseado.

#### **4.6.3.7. Conmutación de la escala en el display**

Cambiar el factor de escala por división (por ejemplo, de 10 dB/división a 1 dB/división o modo lineal) introduce incertidumbre asociada con las características relativas a la calibración de los amplificadores logarítmicos/lineales.

Se puede evitar añadir este error simplemente no cambiando la escala del analizador.

### **4.6.4. Factores de incertidumbre en amplitudes absolutas**

#### **4.6.4.1. Respuesta en frecuencia**

La incertidumbre en respuesta en frecuencia absoluta describe la mayor incertidumbre de amplitud posible sobre un rango de frecuencia dado relativo a la amplitud una señal de referencia de amplitud.



#### **4.6.4.2. Calibrador**

Las medidas de nivel absoluto son medidas relativas a una señal de calibración, que tiene una amplitud conocida. La mayoría de los analizadores de espectros tienen un calibrador que provee una señal con una amplitud específica a una frecuencia.

## Capítulo 5. Cálculo de Incertidumbres para un Analizador de Espectros

---

En este apartado se aplicará toda la teoría desarrollada en el Capítulo 3 para desarrollar el Cálculo de Incertidumbre para un analizador de espectros en concreto. El analizador seleccionado es el ESA E4405B de la compañía Keysight Technologies. El rango de frecuencias que es capaz de medir es de 9 kHz hasta 13.2 GHz. La hoja de especificaciones se adjunta en el Anexo II.

El cálculo de Incertidumbres se desarrollará para algunas de las pruebas que aparecen en la guía de calibración del equipo. La calibración es un requisito indispensable en cualquier equipo de instrumentación para comprobar si el equipo cumple con las especificaciones que determinan el correcto funcionamiento del mismo.

De la guía de calibración se ha seleccionado las siguientes pruebas:

- Precisión de Amplitud absoluta
- Distorsión Segundo armónico
- Fidelidad de la escala del display
- Conmutación Atenuador de Entrada

La instrumentación empleada para la realización de los tests es la siguiente:

Fabricante	Modelo	Descripción
Keysight Technologies	E8257D	PSG Analog Signal Generator, 100 kHz to 67 GHz
Keysight Technologies	8496H	Programmable Attenuator, 18 GHz, 110dB, 10 dB steps
Keysight Technologies	8494H	Programmable Attenuator, 18 GHz, 11dB, 10 dB steps
Keysight Technologies	11713A	Attenuator/Switch Driver [Obsoleto]
Keysight Technologies	E4419B	EPM Series Dual-Channel Power Meter
Keysight Technologies	11667B	Power Splitter, 26.5 GHz
Keysight Technologies	8485A	Power Sensor, 50 MHz - 26,5 GHz
Keysight Technologies	8491B - 020	Coaxial Fixed Attenuator, DC to 18 GHz

Tabla 5.1. Instrumentación Empleada

Además, para la realización de las pruebas serán requeridos cables, conectores y filtros como accesorios a la instrumentación requerida.

## 5.2 Precisión de Amplitud Absoluta

La combinación de un sensor de potencia, un power splitter, y un atenuador es caracterizada a 50 MHz usando un segundo sensor de referencia. Seguidamente, el atenuador es conectado a la entrada de analizador de espectros y el nivel de potencia del generador de señal es ajustado a un nivel apropiado a 50 MHz.

Conectar los equipos según muestra la figura 5.1 para caracterizar previamente el sistema de medida y a continuación conectar los equipos según figura 5.2 para realizar la medida.

La señal de 50 MHz es medida con el analizador de espectros bajo test (DUT, del inglés, Device Under Test).

La diferencia entre la lectura del medidor de la potencia y la lectura en analizador de espectros, corregida con los valores de parametrización del splitter obtenidos anteriormente, es calculada.

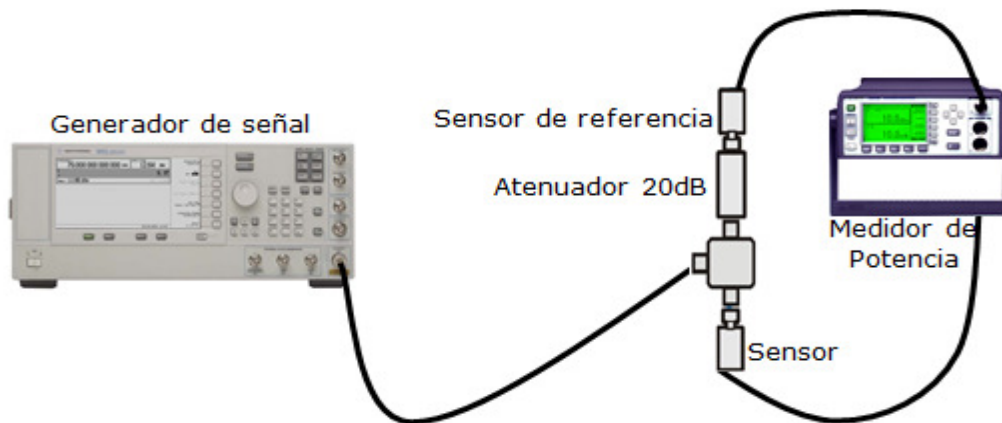


Figura 5.2. Caracterización del Power Splitter

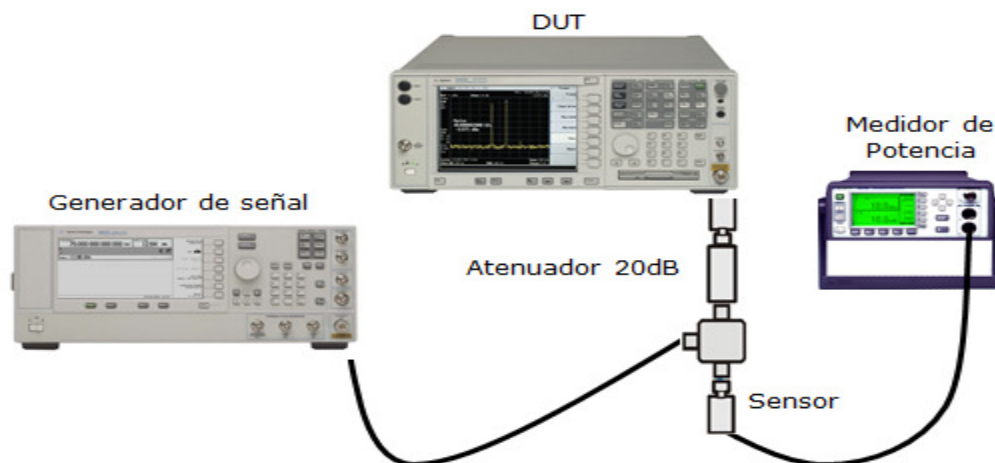


Figura 5.3. Medida del Analizador de espectros

- Ecuación de medida

$$Y = A_{medida} - A_{real}$$

$A_{medida}$  : Amplitud de la señal medida en el analizador de espectros.

$A_{real}$  : Amplitud de la señal medida en el medidor de potencia.

- Ecuación de Incertidumbre:

Puesto que los términos  $A_{medida}$  y  $A_{real}$  son independientes, la ecuación de Incertidumbre es:

$$u_Y^2 = (C_{A_{medida}}^2 * u_{A_{medida}}^2) + (C_{A_{real}}^2 * u_{A_{real}}^2)$$

$u_Y$  : Incertidumbre Combinada Estándar.

$C_i$  : Coeficientes de Sensibilidad.

$u_{x_i}$  : Incertidumbres Estándar para la entrada Xi.

- Coeficientes de Sensibilidad

$$C_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$$

Los coeficientes de sensibilidad son 1.

– Covarianza

Los términos  $A_{medida}$  y  $A_{real}$  son independientes luego la covarianza para estos términos es 0.

– Estimación de Incertidumbres:

- Incertidumbre introducida por la amplitud medida.

No existe asociada incertidumbre a la medida, está referenciada a la Incertidumbre del sensor de potencia y es la que debemos calcular.

- Incertidumbre tipo A

La incertidumbre tipo A que es calculada a partir de la desviación típica de la medida suponemos que vale 0.05, el valor medido es de 2.6 dB y que el número de medidas que se han realizado son 10, esto se tomará como premisa para todos los cálculos, ya que es desconocida.

$$x_{TipoA} = \pm 0.05 \text{ dB}$$

$$u_{tipoA} = \frac{100x(10^{\frac{0.05}{10}} - 1)}{\sqrt{10}} = \pm 0.366 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre introducida por la amplitud real.

La amplitud real va ser la que leeremos en el medidor de potencia.

Según el procedimiento de medidas de potencia, usando un medidor de potencia y un sensor se obtiene que las componentes de error que tiene la incertidumbre introducida por la lectura en el medidor de potencia son:

- $u_{P_m}$  : Incertidumbre de instrumentación del medidor de potencia.

De la hoja de datos del medidor de potencia se sabe que es  $\pm 0,5\%$ .

$$u_{P_m} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = \pm 0.3 \text{ (\%)}$$

- $u_{P_{mc}}$  : Incertidumbre del medidor de potencia durante la calibración.

De la hoja de datos del medidor de potencia, es  $\pm 0,5 \text{ \%}$ .

$$u_{P_{mc}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = \pm 0.3 \text{ (\%)}$$

- $u_D$  : Incertidumbre de la deriva ("drift") del medidor de potencia.

De la hoja de datos del medidor de potencia obtenemos que es de  $\pm 0.1\%$  de la escala completa para el rango 1, con un decremento de 10 por cada incremento del rango. Para un fondo de escala de 100 uW y una medida de 50 uW tenemos:

$$u_D = \frac{0.1}{\sqrt{3} \times 50} = \pm 0.00115 \text{ (\%)}$$

- $u_{Kb}$  : Incertidumbre por calibración del sensor.

De un certificado de calibración del sensor obtenemos que a 50 MHz tenemos  $\pm 0.55\%$ .

$$u_{Kb} = \frac{0.55}{2} = \pm 0.275 \text{ (\%)}$$

Para obtener la Componente de Incertidumbre esta vez se divide por 2 por provenir los datos de un certificado de calibración.

- $u_{Cal}$  : Incertidumbre por calibración del sensor de referencia.

De un certificado de calibración del sensor obtenemos que a 50 MHz tenemos  $\pm 0.9\%$ .

$$u_{Pcal} = \frac{0.9}{2} = \pm 0.45 (\%)$$

Para obtener la Componente de Incertidumbre se divide por 2 por provenir los datos de un certificado de calibración.

- Incertidumbre introducida por el tracking y por la desadaptación de impedancias (mismatch).
  - El tracking se determina inicialmente y se obtiene que la Incertidumbre que introduce el splitter es del 0.02%

$$u_{track} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = \pm 0.0115 (\%)$$

- Incertidumbre mismatch: Existe desadaptación de impedancias luego habrá Incertidumbre por mismatch.



Calculo de las componentes de error mismatch  $u_{mismatch}$  :

SWR<sub>DUT</sub>=2; hoja de especificaciones del analizador de espectros

$$\Gamma_{DUT} = \frac{SWR-1}{SWR+1} = \frac{1.5-1}{1.5+1} = 0.2$$

$\Gamma_{Atenuador} = 0.03$ ; hoja de especificaciones del atenuador usado

$$u_{mismatch}(x_i) = \frac{100((1 \pm |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|)^2 - 1)}{\sqrt{2}} (\%)$$

$$u_{mismatch1} = \frac{100((1 \pm |\Gamma_{DUT}| \cdot |\Gamma_{atenuador}|)^2 - 1)}{\sqrt{2}} = \pm 0.42 (\%)$$

La desadaptación entre el splitter y el atenuador es despreciable ya que tienen muy buen SWR.

$$\Gamma_{\text{sensor}} = 0.03; \text{ hoja de especificaciones del sensor}$$

$$\Gamma_{\text{splitter}} = 0.012; \text{ certificado de calibración del splitter}$$

$$u_{\text{mismatch1}} = \frac{100 \left( (1 + |\Gamma_{\text{sensor}}|)^2 + |\Gamma_{\text{splitter}}|^2 \right)}{\sqrt{2}} = \pm 0.051 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre combinada y grados de libertad

La incertidumbre combinada viene regida por la siguiente fórmula:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=0}^n (c_i u(x_i))^2$$

Componentes de error $X_i$	Medida $x_i$	Incertidumbre Estandar $u(x_i)$	Distribución de Probabilidad	Coeficientes de Sensibilidad $c_i$	Contribución a la Incertidumbre $u_i(y)$
Y	2,6 dB	0,366 %	Normal	1	0,366 %
Pm	0	0,3 %	Rectangular	1	0,3 %
Pmc	0	0,3 %	Rectangular	1	0,3 %
Ud	0	0,00115 %	Rectangular	1	0,00115 %
Ukb	0	0,275 %	Rectangular	1	0,275 %
Upca	0	0,45 %	Rectangular	1	0,45 %
Utrack	0	0,00115 %	Rectangular	1	0,00115 %
Umismatch1	0	0,42 %	U-Shapped	1	0,42 %
Umismatch2	0	0,051 %	U-Shapped	1	0,051 %
Umismatch2	0	0,02 %	k=2	1	0,02 %
Ydut	2,6 dB				1,243996512 %
Grados de Libertad =		1334,603653			

Tabla 5.2. Tabla de Incertidumbres Precisión Amplitud

La tabla 5.2 muestra para un valor medido además de los valores de la Incertidumbre Independiente, la sensibilidad y la contribución de cada componente. Además se muestra la Incertidumbre Combinada y el Grado de libertad para esta medida.

La incertidumbre Estándar Combinada calculada para los valores que aparecen en la tabla es:

$$u_c(y) = 1.244 \%$$

Para el cálculo de los grados de libertad aplicamos la siguiente fórmula cuyos parámetros  $u_{tipoA}$  y  $u_C$  (y) los tenemos ya calculados.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_A^4(y)}{n-1}} = 1227$$

- Incertidumbre Expandida

Para una Probabilidad de Cobertura del 95,45% y los grados de libertad calculados a través de la tabla t-Student se obtiene un Factor de Cobertura  $k=2$ .

La Incertidumbre Expandida obtenida será:

$$U = k \times u_C = 2 \times 1.21 \% = \pm 1.42 \%$$

$$= 10 \log\left(\frac{1.42}{100} + 1\right) = 0.061236 \text{ dB}$$

Aplicando los criterios contenidos en la guía EA-4/02 sobre la resolución de la Incertidumbre Expandida reportada nos quedará

$$U = \pm 0.061 \text{ dB}$$

### 5.3 Distorsión del segundo armónico

Para medir la distorsión del segundo armónico, se necesita un filtro paso bajo que se utiliza para filtrar la salida de la fuente de señal, asegurándose de que sean los armónicos leídos los generados internamente por el analizador espectros y no por el generador de señal. La distorsión será la diferencia entre la señal a la frecuencia

portadora y la medida al doble de frecuencia, que corresponde con el armónico de segundo orden.

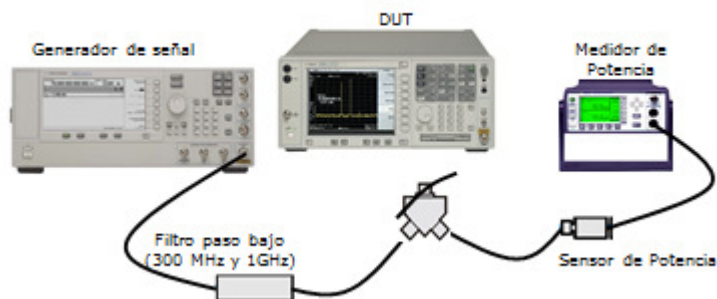


Figura 5.4. Conexión Segundo armónico

– Ecuación de medida

$$Y = A_{Fc} - A_{Fd}$$

$A_{Fc}$  : Amplitud medida a la frecuencia de la portadora.

$A_{Fd}$  : Amplitud medida en el armónico.

– Ecuación de Incertidumbre

Puesto que los términos  $A_{Fd}$  y  $A_{Fc}$  son independientes. La ecuación de Incertidumbre es:

$$u_Y^2 = (C_{A_{Fc}}^2 * u_{A_{Fc}}^2) + (C_{A_{Fd}}^2 * u_{A_{Fd}}^2)$$

$u_Y$  : Incertidumbre Combinada Estándar.

$C_i$  : Coeficientes de Sensibilidad.

$u_{xi}$  : Incertidumbres Estándar para la entrada Xi.

- Coeficientes de Sensibilidad

$$C_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$$

Los coeficientes de sensibilidad son 1.

- Covarianza

Los términos  $A_{medida}$  y  $A_{real}$  son independientes luego la covarianza para estos términos es 0.

- Estimación de Incertidumbres

- Incertidumbre introducida por la amplitud a Fc

Según el procedimiento de medidas de potencia usando un medidor de potencia y un sensor obtenemos que las componentes de error que tiene la incertidumbre introducida por la lectura en el medidor de potencia son:

- $u_{P_m}$  : Incertidumbre de instrumentación del medidor de potencia.

De la hoja de datos del medidor de potencia obtenemos que es de  $\pm 0,3\%$ .

$$u_{P_m} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = \pm 0.3 \text{ (\%)}$$

- $u_{P_{mc}}$  : Incertidumbre del medidor de potencia durante la calibración.

De la hoja de datos del medidor de potencia obtenemos que es de  $\pm 0,5\%$ .

$$u_{P_{mc}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = \pm 0.3 \text{ (\%)}$$

- $u_D$  : Incertidumbre del medidor de potencia “drift”.

De la hoja de datos del medidor de potencia obtenemos que es de  $\pm 0.1\%$  del la escala completa para el rango 1, decremanta en 10 por cada vez que subamos el rango.

$$u_D = \frac{1.04 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} = \pm 0.0006 \text{ (\%)}$$

- $u_{Kb}$  : Incertidumbre por calibración del sensor.

De un certificado de calibración del sensor obtenemos que a 300 MHz tenemos  $\pm 0.7\%$ .

$$u_{Kb} = \frac{0.7}{2} = \pm 0.35 \text{ (\%)}$$

Para obtener la Componente de Incertidumbre esta vez se divide por 2 por provenir los datos de un certificado de calibración.

- $u_{Cal}$  : Incertidumbre por calibración del sensor de referencia.

De un certificado de calibración del sensor obtenemos que a 50 MHz tenemos  $\pm 0.9\%$ .

$$u_{P_{cal}} = \frac{0.9}{2} = \pm 0.45 \text{ (\%)}$$

Para obtener la Componente de Incertidumbre se divide por 2 por provenir los datos de un certificado de calibración.

- Incertidumbre introducida desadaptación de impedancias (mismatch).

Existe desadaptación de impedancias luego habrá Incertidumbre por mismatch, la frecuencia de medida son 300 MHz.

Calculo de las componentes de error mismatch  $u_{mismatch}$  :

$$u_{mismatch}(x_i) = \frac{100((1 \pm |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|)^2 - 1)}{\sqrt{2}} (\%)$$

De la hoja de características del generador obtengo un

$$SWR_{Generador} = 1.5$$

$$\Gamma_{generador} = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} = \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} = 0.2$$

Por otro lado el splitter está calibrado y presenta un coeficiente de reflexión a 300 MHz según sus datos de calibración de 0.025



Además obtengo que el sensor está calibrado también y presenta un coeficiente de reflexión de 0.04 para 300 MHz

$$u_{mismatch1} = \frac{100 \left( (1 + |\Gamma_{Generador}| \cdot |\Gamma_{Splitter}|)^2 \right)}{\sqrt{2}} = \pm 0.708 \text{ (\%)}$$

$$u_{mismatch2} = \frac{100 \left( (1 + |\Gamma_{Sensor}| \cdot |\Gamma_{Splitter}|)^2 \right)}{\sqrt{2}} = \pm 0.141 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre introducida por la amplitud a  $F_D$

Se realiza la misma medida pero al doble de frecuencia, en este caso 600MHz. Sólo cambiarán algunas componentes de incertidumbre.

- $u_{P_m}$  : Incertidumbre de instrumentación del medidor de potencia.

De la hoja de datos del medidor de potencia obtenemos que es de  $\pm 0,3\%$ .

$$u_{P_m} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = \pm 0.3 \text{ (\%)}$$

- $u_{P_{mc}}$  : Incertidumbre del medidor de potencia durante la calibración.

De la hoja de datos del medidor de potencia obtenemos que es de  $\pm 0,5\%$ .

$$u_{P_{mc}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = \pm 0.3 \text{ (\%)}$$

- $u_D$  : Incertidumbre del medidor de potencia “drift”.

De la hoja de datos del medidor de potencia obtenemos que es de  $\pm 0.1\%$  del la escala completa para el rango 1, decremanta en 10 por cada vez que subamos el rango.

$$u_D = \frac{1.04 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} = \pm 0.0006 \text{ (\%)}$$

- $u_{Kb}$  : Incertidumbre por calibración del sensor.

De un certificado de calibración del sensor obtenemos que a 300 MHz tenemos  $\pm 0.9\%$ .

$$u_{Kb} = \frac{0.9}{2} = \pm 0.45 \text{ (\%)}$$

Para obtener la Componente de Incertidumbre esta vez se divide por 2 por provenir los datos de un certificado de calibración.

- $u_{Cal}$  : Incertidumbre por calibración del sensor de referencia.

De un certificado de calibración del sensor obtenemos que a 50 MHz tenemos  $\pm 0.9\%$ .

$$u_{Pcal} = \frac{0.9}{2} = \pm 0.45 \text{ (\%)}$$

Para obtener la Componente de Incertidumbre se divide por 2 por provenir los datos de un certificado de calibración.

- Incertidumbre introducida desadaptación de impedancias (mismatch).

Existe desadaptación de impedancias luego habrá Incertidumbre por mismatch, la frecuencia de medida son 600 MHz.

Calculo de las componentes de error mismatch  $u_{mismatch}$  :

$$u_{mismatch}(x_i) = \frac{100((1 \pm |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|)^2 - 1)}{\sqrt{2}} (\%)$$

De la hoja de características del generador obtengo un

$$SWR_{Generador} = 1.5$$

$$\Gamma_{generador} = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} = \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} = 0.2$$

Por otro lado el splitter está calibrado y presenta un coeficiente de reflexión a 600 MHz según sus datos de calibración de 0.028

Además obtengo que el sensor está calibrado también y presenta un coeficiente de reflexión de 0.042 para 300 MHz

$$u_{mismatch1} = \frac{100((1 + |\Gamma_{Generador}| \cdot |\Gamma_{Splitter}|)^2 - 1)}{\sqrt{2}} = \pm 0.794 (\%)$$

$$u_{mismatch2} = \frac{100((1 + |\Gamma_{Sensor}| \cdot |\Gamma_{Splitter}|)^2 - 1)}{\sqrt{2}} = \pm 0.166 (\%)$$

- Incertidumbre tipo A

La incertidumbre tipo A que es calculada a partir de la desviación típica de la medida supondremos que vale 0.05, el valor medido es de -45.8 dB que es la diferencia entre los -0.6 dBm a 300 MHz y de -45.2 dBm para 600 MHz y que el número de medidas que se han realizado son 10, esto lo tomaremos como premisa para todos los cálculos ya que es desconocida.

$$x_{TipoA} = \pm 0.05 \text{ dB}$$

$$u_{tipoA} = \frac{100x(10^{\frac{0.05}{10}} - 1)}{\sqrt{10}} = \pm 0.36 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre Combinada y Grados de Libertad

La incertidumbre combinada viene regida por la siguiente fórmula:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=0}^n (c_i u(x_i))^2$$

Componentes de error $x_i$	Medida $x_i$	Incertidumbre Estandar $u(x_i)$	Distribución de Probabilidad	Coeficientes de Sensibilidad $c_i$	Contribución a la Incertidumbre $u_i(y)$
Y	35,8 dB	0,36 %	Normal	1	0,36 %
Pm	0	0,3 %	Rectangular	1	0,3 %
Pmc	0	0,3 %	Rectangular	1	0,3 %
Ud	0	0,006 %	Rectangular	1	0,006 %
Ukb	0	0,35 %	k=2	1	0,35 %
Upca1	0	0,45 %	k=2	1	0,45 %
Umismatch1	0	0,708 %	U-Shapped	1	0,708 %
Umismatch2	0	0,141 %	U-Shapped	1	0,141 %
Pm	0	0,3 %	Rectangular	1	0,3 %
Pmc	0	0,3 %	Rectangular	1	0,3 %
Ud	0	0,006 %	Rectangular	1	0,006 %
Ukb	0	0,35 %	k=2	1	0,35 %
Upca1	0	0,45 %	k=2	1	0,45 %
Umismatch1	0	0,794 %	U-Shapped	1	0,794 %
Umismatch2	0	0,166 %	U-Shapped	1	0,166 %
Ydut	35,8 dB			Uc	1,774162619 %
Grados de Libertad =		5898,800326			

Tabla 5.3. Tabla de Incertidumbres SHD

La tabla 5.3 muestra para un valor medido además de los valores de la Incertidumbre Independiente así como la sensibilidad y la contribución de cada componente. Además se muestra la Incertidumbre Combinada y el Grado de libertad para esta dicha medida.

La Incertidumbre Estándar Combinada calculada para los valores que aparecen en la tabla es:

$$u_c(y) = 1.7741 \%$$

Para el cálculo de los Grados de Libertad aplicamos la siguiente fórmula cuyos parámetros  $u_{tipoA}$  y  $u_C(y)$  los tenemos ya calculados.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_A^4(y)}{n-1}} = 5898$$

- Incertidumbre Expandida

Para una Probabilidad de Cobertura del 95,45% y los grados de libertad calculados a través de la tabla t-Student se obtiene un Factor de Cobertura =2

La Incertidumbre Expandida obtenida será:

$$U = k \times u_c = 2 \times 1.774 \% = \pm 3.548 \%$$

$$= 10 \log\left(\frac{3.548}{100} + 1\right) = 0.1514 \text{ dB}$$

Aplicando los criterios contenidos en la guía EA-4/02 sobre la resolución de la Incertidumbre Expandida reportada nos quedará

$$\mathbf{U = \pm 0.15 \text{ dB}}$$

## 5.4 Fidelidad de escala del display

Una señal de 50 MHz es aplicada a la entrada del analizador de espectros mediante dos atenuadores de pasos calibrados. Los atenuadores fijan la amplitud estándar de referencia. La fuente se ajusta para una respuesta al nivel de referencia. Los atenuadores entonces varían los pasos para ir modificando la amplitud nominal por debajo del nivel de referencia. El marcador de amplitud del analizador es comparado con la atenuación total real para determinar el error de la fidelidad de la escala.

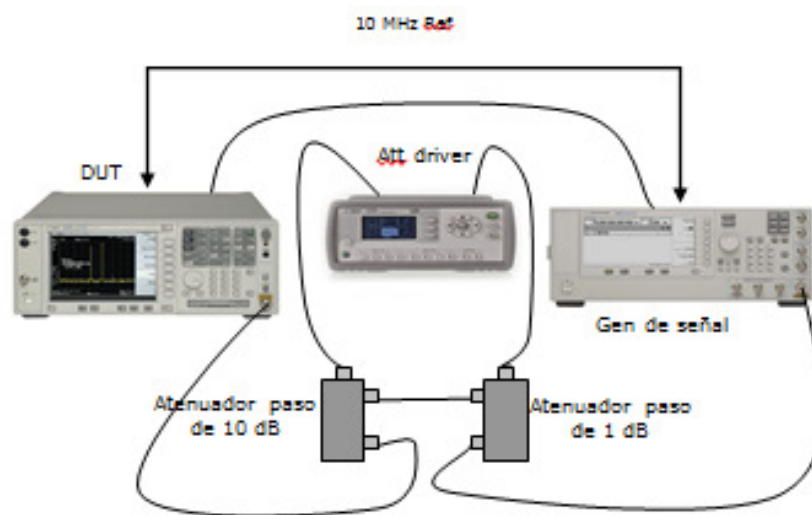


Figura 5.5. Conexión Scale Fidelity

– Ecuación de medida

$$Y = (A_{mkr\_x} - A_{mkref}) - (A_{atten\_x} - A_{attenref})$$

$A_{mkr\_x}$  = Amplitud marcada desde -4 dB hasta -98 dB respecto al nivel de referencia.

$A_{mkref}$  = Amplitud marcada al nivel de referencia.

$A_{atten\_x}$  = Valor de los atenuadores de paso para -4 dB hasta -98dB respecto el nivel de referencia.

$A_{attenref}$  = Valor del atenuador de paso para el nivel de referencia

#### – Ecuación de Incertidumbre

Puesto que los términos  $A_{mkr\_x}$ ,  $A_{mkrref}$ ,  $A_{atten\_x}$  y  $A_{attenref}$  son independientes, hay que incluir como componentes de error la precisión de los atenuadores, la de calibración y el mismatch. La ecuación de Incertidumbre es:

$$u_Y^2 = (C_{mkr\_x}^2 * u_{A_{mkr\_x}}^2) + (C_{mkrref}^2 * u_{A_{mkrref}}^2) + (C_{atten\_x}^2 * u_{A_{atten\_x}}^2) + (C_{attenref}^2 * u_{A_{attenref}}^2)$$

$u_Y$ : Incertidumbre Combinada Estándar.

$C_i$ : Coeficientes de Sensibilidad.

$u_{xi}$ : Incertidumbre estándar para la entrada Xi.

#### – Coeficientes de Sensibilidad

$$C_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$$

La ecuación de medida es lineal luego los coeficientes de sensibilidad son 1.

#### – Covarianza

Los términos  $A_{mkr\_x}$ ,  $A_{mkrref}$ ,  $A_{atten\_x}$  y  $A_{attenref}$  son independientes luego la covarianza para estos términos es 0.



– Estimación de Incertidumbres

- Incertidumbre introducida por el Marker al valor de atenuación:

La resolución del Marker es la única componente de  $A_{mkr\_x}$ .

Según la hoja de especificaciones del analizador obtenemos que la resolución en la escala logarítmica es:  $x_{A_{mkr}} \pm 0.04$  dB.

Es necesario pasar a valor absoluto (% en este caso) para poder operar las incertidumbres

$$u_{A_{mkr}} = \frac{10^{(x_{mkr}/10)} - 1}{\sqrt{3}} \times 100$$

Como la escala logarítmica no es simétrica se tomará la parte positiva, por ser el peor caso.

$$u_{mkr \max} = \frac{10^{(0.04/10)} - 1}{\sqrt{3}} \times 100 = 0,5342 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre introducida al nivel de referencia:

La resolución del Marker es la única componente de  $A_{mkr\_x}$ , igual que la componente anterior.

A la luz de la hoja de especificaciones, se sabe que la resolución en la escala logarítmica es:  $x_{A_{mkr}} \pm 0.04$  dB.

Como la escala logarítmica no es simétrica se tomará la parte positiva, que es el peor caso.

$$u_{mkrref} = \frac{10^{(0.04/10)} - 1}{\sqrt{3}} \times 100 = 0,5342 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre introducida por los atenuadores de pasos en función de la atenuación.

Los atenuadores utilizados han sido calibrados anualmente durante los últimos 10 años, por tanto utilizaremos esta información para obtener la estabilidad de los mismos, mejorando de este modo la especificación dada en las especificaciones técnicas por el fabricante. Por tanto los valores a utilizar como incertidumbre de estabilidad serán los siguientes:

- 8494G. Atenuador programable de saltos de 1dB.

Precisión del atenuador=  $\pm 0.02$  dB (1-2 dB)

$\pm 0.03$  dB (3-6 dB)

$\pm 0.04$  dB (7-10 dB)

$\pm 0.05$  dB (11 dB)

- 8496G. Atenuador programable de saltos de 10dB.

Precisión del atenuador=  $\pm 0.02$  dB (10 dB)

$\pm 0.08$  dB (60 dB)

$\pm 0.12$  dB (80 dB)

$\pm 0.15$  dB (90 dB)

$\pm 0.16$  dB (100 dB)

$\pm 0.18$  dB (110 dB)

La medida se realiza a 50 MHz por lo que la incertidumbre mismatch producida por la desadaptación de impedancias es despreciable.

Se calculará la precisión a 44 dB del nivel de referencia.

Por tanto, se seleccionará el atenuador de pasos de 10 dB en 40 dB y el de pasos de 1 dB en 4 dB. Son dos componentes de incertidumbre, una introducida por el atenuador de pasos de 10 dB y otra por el atenuador de pasos de 1 dB.

$$x_{A_{atten10\_40\text{ dB}}} = \pm 0.08 \text{ dB}$$

$$x_{A_{atten10\_40\text{ dB}}} = \frac{10^{\frac{0.08}{10}} - 1}{2} \times 100 = \pm 0.929\%$$

$$x_{A_{atten1\_4\text{ dB}}} = \pm 0.03 \text{ dB}$$

$$x_{A_{atten1\_4\text{ dB}}} = \frac{10^{\frac{0.03}{10}} - 1}{2} \times 100 = \pm 0.346\%$$

- Incertidumbre introducida por los atenuadores de pasos al nivel de referencia.

Los atenuadores están calibrados, y del certificado de calibración se obtiene que el valor de la Incertidumbre cuando no hay ningún paso de atenuación introducido es:

- 8494G. Atenuador programable de saltos de 1dB.

Presición del atenuador =  $\pm 0.0 \text{ dB}$  (0 dB)

- 8496G. Atenuador programable de saltos de 10dB.

Presición del atenuador=  $\pm 0.02$  dB (0 dB)

$$x_{A_{attenref10\_0dB}} = \pm 0.02 \text{ dB}$$

$$x_{A_{attenref10\_0dB}} = \frac{10^{\frac{0.02}{10}} - 1}{2} \times 100 = \pm 0.23\%$$

$$x_{A_{attenref1\_0dB}} = \pm 0.00 \text{ dB}$$

$$x_{A_{attenref10\_0dB}} = \frac{10^{\frac{0.00}{10}} - 1}{2} \times 100 = \pm 0.0\%$$

- Incertidumbre tipo A

La incertidumbre tipo A que es calculada a partir de la desviación típica de la medida. Asumimos 0.005 dB y que el número de medidas que se han realizado son 10. Esto, se tomará como premisa para todos los cálculos ya que es desconocida.

$$x_{TipoA} = \pm 0.005 \text{ dB}$$

$$u_{TipoA} = \frac{10^{\frac{0.005}{10}} - 1}{\sqrt{10}} \times 100 = \pm 0.036 \%$$

- Incertidumbre combinada y grados de libertad

La Incertidumbre Combinada viene regida por la siguiente fórmula:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=0}^n (c_i u(x_i))^2$$

Componentes de error $X_i$	Medida $x_i$	Incertidumbre Estandar $u(x_i)$	Distribución de Probabilidad	Coeficientes de Sensibilidad $c_i$	Contribución a la Incertidumbre $u_i(y)$
Y	0,22 dB	0,036 %	Normal	1	0,036 %
umkr	0	0,5342 %	Rectangular	1	0,5342 %
Umrkref	0	0,5342 %	Rectangular	1	0,5342 %
Uaten10	0	0,929 %	k=2	1	0,929 %
Uaten1	0	0,346 %	k=2	1	0,346 %
Uatenref10	0	0,23 %	k=2	1	0,23 %
Uatenref1		0 %	k=2	1	0 %
Ydut	0,22 dB			Uc	1,267948059 %
Grados de Libertad =		13849635,99			

Tabla 5.4. Tabla de Incertidumbres Scale Fidelity

La tabla 5.4 muestra para un valor medido supuesto de 0.22 dB (que es el máximo que dice las especificaciones puede tener el sistema para su correcto funcionamiento) los valores de la Incertidumbre Independiente así como la sensibilidad y la contribución de cada componente. Además calcula la Incertidumbre Combinada y el Grado de Libertad para esta dicha medida.

La Incertidumbre Estándar Combinada calculada para los valores que aparecen en la tabla es:

$$u_c(y) = 1.267948 (\%)$$

Para el cálculo de los grados de libertad aplicamos la siguiente fórmula cuyos parámetros  $u_{tipoA}$  y  $u_C(y)$  los tenemos ya calculados.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_A^4(y)}{n-1}} = 13849636$$

- Incertidumbre expandida

Para una Probabilidad de Cobertura del 95,45% y un el Grado de Libertad calculado se obtiene un a través de la tabla t-Student un Factor de cobertura  $k=2$ .

La Incertidumbre Expandida obtenida será:

$$U = k \times u_C = 2 \times 1.267948 = \pm 2.5358 \%$$

$$= 10 \log\left(\frac{1.786}{100} + 1\right) = 0.10875 \text{ dB}$$

Aplicando los criterios contenidos en la guía EA-4/02 sobre la resolución de la Incertidumbre Expandida reportada nos quedará

$$\mathbf{U = \pm 0.11 \text{ dB}}$$

## 5.5 Conmutación del Atenuador de Entrada

Una señal de 50 MHz es aplicada a la entrada del analizador a través de dos atenuadores de pasos calibrados. Los atenuadores son la amplitud estándar de referencia. La fuente se ajusta para que su respuesta sea el nivel de referencia. Los atenuadores internos entonces se varían según los ajustes de los atenuadores externos para que mantengan el mismo nivel de señal datos en el mezclador, y por tanto de señal en el display. La función marker del analizador se utiliza para medir las diferencias de la amplitud con el valor real de la atenuación de los atenuadores del paso.

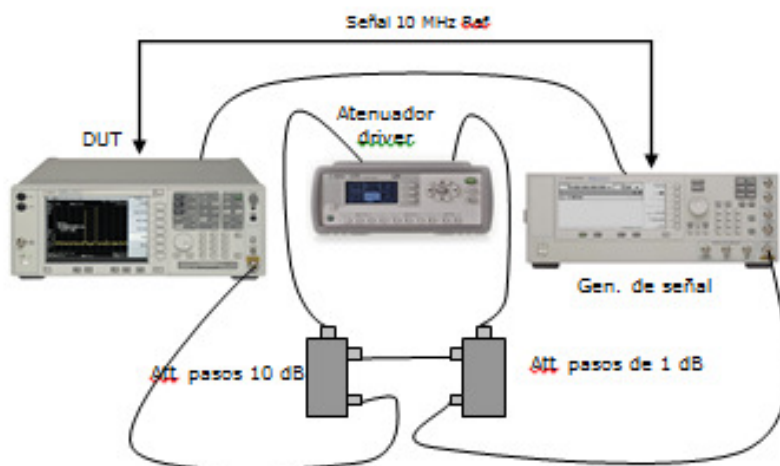


Figura 5.6. Conexión de conmutación de atenuador de entrada



– Ecuación de medida

La medida ecuación de medida es igual que la anterior, lo que cambia es procedimiento de medida, ahora se va cambiando el atenuador de entrada y el valor de atenuación de los atenuadores para que siempre se obtenga el mismo nivel de potencia en pantalla.

$$Y = (A_{mkr\_x} - A_{mkrref}) - (A_{atten\_x} - A_{attenref})$$

$A_{mkr\_x}$  = Amplitud marcada para respecto el nivel de referencia.

$A_{mkrref}$  = Amplitud marcada al nivel de referencia.

$A_{atten\_x}$  = Valor de los atenuadores de paso para -4 dB hasta -98dB respecto el nivel de referencia.

$A_{attenref}$  = Valor del atenuador de paso para el nivel de referencia

– Ecuación de Incertidumbre

Puesto que los términos  $A_{mkr\_x}$ ,  $A_{mkrref}$ ,  $A_{atten\_x}$  y  $A_{attenref}$  son independientes, hay que incluir como componentes de error la precisión de los atenuadores, la de calibración y el mismatch. La ecuación de incertidumbre es:

$$u_Y^2 = (C_{mkr\_x}^2 * u_{A_{mkr\_x}}^2) + (C_{mkrref}^2 * u_{A_{mkrref}}^2) + (C_{atten\_x}^2 * u_{A_{atten\_x}}^2) + (C_{attenref}^2 * u_{A_{attenref}}^2)$$

$u_Y$  : Incertidumbre Combinada Estándar.

$C_i$  : Coeficientes de Sensibilidad.

$u_{x_i}$  : Incertidumbre estándar para la entrada  $X_i$ .

- Coeficientes de Sensibilidad

$$C_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$$

La ecuación de medida es lineal luego los coeficientes de sensibilidad son 1.

- Covarianza

Los términos  $A_{mkr\_x}$ ,  $A_{mkrref}$ ,  $A_{atten\_x}$  y  $A_{attenref}$  son independientes luego la covarianza para estos términos es 0.

- Estimación de Incertidumbres

- Incertidumbre introducida por el Marker al valor de atenuación:

La resolución del Marker es la única componente de  $A_{mkr\_x}$ .

Según la hoja de especificaciones se observa que la resolución en la escala logarítmica es  $x_{A_{mkr}} \pm 0.04$  dB.

Es necesario pasar a valor absoluto (% en este caso) para poder operar las incertidumbres

$$u_{A_{mkr}} = \frac{10^{(x_{mkr}/10)} - 1}{\sqrt{3}} \times 100$$

Como la escala logarítmica no es simétrica deberemos tomar la parte positiva que es el peor caso.

$$u_{mkr \max} = \frac{10^{(0.04/10)} - 1}{\sqrt{3}} \times 100 = 0,5342 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre introducida al nivel de referencia:

La resolución del Marker es la única componente de  $A_{mkr\_x}$ , igual que la componente anterior.

En la hoja de especificaciones se observa que la resolución en la escala logarítmica es  $x_{A_{mkr}} \pm 0.04 \text{ dB}$ .

Como la escala logarítmica no es simétrica deberemos tomar la parte positiva que es el peor caso.

$$u_{mkr \max} = u_{mkr \min} = \frac{10^{(0.04/10)} - 1}{\sqrt{3}} \times 100 = 0,5342 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre introducida por los atenuadores de pasos en función de la atenuación.

Los atenuadores están calibrados. Del certificado de calibración se obtiene que el valor de la Incertidumbres:

- 8494G. Atenuador programable de saltos de 1dB.

Precisión del atenuador=	$\pm 0.02$ dB (1-2 dB)
	$\pm 0.03$ dB (3-6 dB)
	$\pm 0.04$ dB (7-10 dB)
	$\pm 0.05$ dB (11 dB)

- 8496G. Atenuador programable de saltos de 10dB.

Precisión del atenuador=	$\pm 0.02$ dB (10 dB)
	$\pm 0.08$ dB (60 dB)
	$\pm 0.12$ dB (80 dB)
	$\pm 0.15$ dB (90 dB)
	$\pm 0.16$ dB (100 dB)
	$\pm 0.18$ dB (110 dB)

La medida se realiza a 50 MHz por lo que la incertidumbre mismatch producida por la desadaptación de impedancias es despreciable.

El cálculo se va a realizar para una atenuación de 15 dB en el atenuador de entrada del analizador.

Luego tendremos el atenuador de paso de 10 dB en 10 dB y el de paso de un dB a 5 dB. Son dos componentes de incertidumbre: una la introducida por el atenuador de pasos de 10 dB y otra por el atenuador de pasos de 5 dB.

$$x_{A_{atten10\_60\,dB}} = \pm 0.02 \text{ (dB)}$$

$$u_{A_{atten10\_60\,dB}} = \frac{10^{\frac{0.02}{10}} - 1}{2} \times 100 = \pm 0.23 \text{ (\%)}$$

$$x_{A_{atten1\_5\,dB}} = \pm 0.03 \text{ (dB)}$$

$$u_{A_{atten1\_5\,dB}} = \frac{10^{\frac{0.03}{10}} - 1}{2} \times 100 = \pm 0.346 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre introducida por los atenuadores de pasos al nivel de referencia.

Atenuadores calibrados, del certificado de calibración se obtiene que el valor de la Incertidumbre cuando no hay seleccionado ningún paso de atenuación es:

- 8494G. Atenuador programable de saltos de 1dB.

Precisión del atenuador =  $\pm 0.0$  dB (0 dB)

- 8496G. Atenuador programable de saltos de 10dB.

Precisión del atenuador =  $\pm 0.02$  dB (0 dB)

$$x_{A_{attenref10\_0dB}} = \pm 0.02 \text{ (dB)}$$

$$u_{A_{attenref10\_0dB}} = \frac{10^{\frac{0.02}{10}} - 1}{2} \times 100 = \pm 0.23 \text{ (\%)}$$

$$x_{A_{attenref1\_0dB}} = \pm 0.00 \text{ (dB)}$$

$$u_{A_{attenref1\_0dB}} = \frac{10^{\frac{0.00}{10}} - 1}{2} \times 100 = \pm 0.0 \text{ (\%)}$$

- Incertidumbre tipo A

La incertidumbre tipo A que es calculada a partir de la desviación típica de la medida, asumimos un valor de 0.005 dB y que el número de medidas que se han realizado son 10. Esto se toma como premisa para todos los cálculos ya que es desconocida.

$$x_{TipoA} = \pm 0.005 \text{ dB}$$

$$u_{TipoA} = \frac{10^{\frac{0.005}{10}} - 1}{\sqrt{10}} \times 100 = \pm 0.036 \%$$

- Incertidumbre Combinada y Grados de Libertad

La Incertidumbre Combinada viene regida por la siguiente fórmula:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=0}^n (c_i u(x_i))^2$$

Componentes de error $X_i$	Medida $x_i$	Incertidumbre Estandar $u(x_i)$	Distribución de Probabilidad	Coeficientes de Sensibilidad $c_i$	Contribución a la Incertidumbre $u_i(y)$
Y	0,11 dB	0,036 %	Normal	1	0,036 %
umkr	0	0,5342 %	Rectangular	1	0,5342 %
umrkref	0	0,5342 %	Rectangular	1	0,5342 %
uaten10	0	0,23 %	k=2	1	0,23 %
uaten1	0	0,346 %	k=2	1	0,346 %
uatenref10	0	0,23 %	k=2	1	0,23 %
uatenref1		0 %	k=2	1	0 %
Ydut	0,11 dB			Uc	0,893057266 %
Grados de Libertad =		3408393,584			

Tabla 5.5. Tabla de incertidumbres Conmutación del atenuador de entrada

La tabla 5.4 muestra para un valor medido supuesto de 0.11 dB (que es el valor máximo especificado según las especificaciones del analizador para su correcto funcionamiento), los valores de la Incertidumbre Independiente así como la sensibilidad y la contribución de cada componente. Calcula la Incertidumbre Combinada y el Grado de Libertad para dicha medida.

La Incertidumbre Estándar Combinada calculada para los valores que aparecen en la tabla es:

$$u_c(y) = 0.893 (\%)$$

Para el cálculo de los grados de libertad aplicamos la siguiente fórmula cuyos parámetros  $u_{tip0A}$  y  $u_c(y)$  los tenemos ya calculados.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_A^4(y)}{n-1}} = 3408393$$



- Incertidumbre expandida

Para una Probabilidad de Cobertura del 95,45% y un el Grado de Libertad calculado se obtiene un a través de la Tabla t-Student un Factor de cobertura  $k=2$ .

La Incertidumbre Expandida obtenida será:

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.893 = \pm 1.786 \%$$

$$= 10 \log\left(\frac{1.786}{100} + 1\right) = 0.0768 \text{ dB}$$

Aplicando los criterios contenidos en la guía EA-4/02 sobre la resolución de la Incertidumbre Expandida reportada nos quedará

$$U = \pm 0.077 \text{ dB}$$

## 5.6 Comentarios al Cálculo de Incertidumbres

Para la realización de este proyecto, se han tomado para el cálculo de las incertidumbres de los ejemplos que hemos visto, valores concretos de atenuación para los atenuadores de pasos, con su incertidumbre asociada obtenida del certificado de calibración del mismo, así como en el caso de la incertidumbre de los sensores empleados para la prueba.

En la práctica, para ahorrar tiempo y evitar errores, se emplea el apoyo de tablas en Excel, en el que simplemente hay que introducir los valores y automáticamente, mediante el empleo de la metodología y fórmulas que se han estudiado, calcula la incertidumbre.

El diagrama de flujo del funcionamiento de la tabla Excel se puede observar en el Anexo I.

Éste es el aspecto que tiene la tabla Excel en el que nos da la incertidumbre obtenida:

FUNCION	NOMINAL	FRECUENCIA	DES VIACIÓN	TOLERANCIA	INCERT.
INPUT ATTENUATOR					
SWITCHING UNCERTAINTY	0 dB	50MHz	-0,06 dB	± 0,30 dB	± 0,14 dB
	5 dB	50MHz	0,03 dB	± 0,30 dB	± 0,13 dB
	15 dB	50MHz	0,03 dB	± 0,30 dB	± 0,07 dB
	20 dB	50MHz	0,02 dB	± 0,30 dB	± 0,09 dB
	25 dB	50MHz	0,03 dB	± 0,35 dB	± 0,07 dB
	30 dB	50MHz	0,02 dB	± 0,40 dB	± 0,14 dB
	35 dB	50MHz	0,00 dB	± 0,45 dB	± 0,08 dB
	40 dB	50MHz	-0,05 dB	± 0,50 dB	± 0,14 dB
	45 dB	50MHz	-0,11 dB	± 0,55 dB	± 0,08 dB
	50 dB	50MHz	-0,17 dB	± 0,60 dB	± 0,15 dB
	55 dB	50MHz	-0,32 dB	± 0,65 dB	± 0,15 dB
	60 dB	50MHz	-0,05 dB	± 0,70 dB	± 0,15 dB
	65 dB	50MHz	-0,04 dB	± 0,75 dB	± 0,09 dB

Figura 5.7. Hoja de resultados Conmutación del atenuador de entrada

Como podemos observar, la incertidumbre cambia en función de los valores del atenuador de pasos, el factor de calibración del sensor, etc.

## Capítulo 6. Estudio Económico

En el cálculo del coste de la realización d este proyecto, debe tenerse en cuenta el coste de uso de los equipos requeridos para la realización del cálculo de incertidumbres. Los equipos son propiedad de Keysight Technologies Spain S.L.U., por lo que no es necesaria la compra de los mismos, lo que resultará inabordable.

También, se ha incluido el coste por hora de ingeniero que indica Keysight Technologies para sus empleados.

Por último, se indica cuál es el precio de calibración de un E4405B como el estudiado, a modo de referencia, en el que se incluye la incertidumbre calculada en el reporte de medidas.

Concepto	Coste Unitario (€/dia)	Cantidad	Total (€)
<b>Instrumentación</b>			
Power Meter E4419B	9,00 €	1	9,00 €
Generador de barrido Sintetizado PSG E8257D	31,00 €	1	31,00 €
Sensor 8485A	20,00 €	2	40,00 €
Power Splitter 11667A	17,00 €	1	17,00 €
Atenuadores de Pasos	20,00 €	2	40,00 €
TOTAL Instrumentación			<b>137,00 €</b>
Mano de Obra	Coste Unitario (€/hora)	Nº Horas	Total (€)
Coste Ingeniero Calibración (Interno)	100,00 €	4	400,00 €
TOTAL Mano de Obra			<b>400,00 €</b>
<b>TOTAL COSTE</b>			<b>537,00 €</b>
<b>Coste calibración E4405B</b>			<b>1.353,00 €</b>

Tabla 6.1. Análisis de Costes

Para El análisis de costes realizado se ha supuesto la utilización de los equipos de instrumentación necesarios durante un día, y un coste de mano de obra de 4 horas, duración estimada de las pruebas. El 11713A (attenuator switch driver), no se ha tenido en cuenta por ser un equipo que no requiere calibración (no es trazable), y se considera como un accesorio para el estudio económico.

Los datos han sido obtenidos de la base de datos de Keysight Technologies. Comprobamos, pues, que el presupuesto para la realización del proyecto es de 537,00€. El coste de calibración de un analizador de espectros ESA E4405B completo es de 1353,00€,

## Capítulo 7. Conclusiones

---

El cálculo de incertidumbres no se basa simplemente en aplicar la matemática necesaria para obtener la incertidumbre combinada y a partir de ésta, junto con el factor de cobertura, la incertidumbre expandida.

La dificultad estriba en los componentes que las forman, que es en función de los equipos empleados y en cómo aplicar el procedimientos para obtener la medida. Por ejemplo, en la prueba de cálculo de la incertidumbre de amplitud absoluta, el empleo de un atenuador a la entrada del analizador viene dado porque aquel tiene un mejor SWR y por lo tanto reducirá la incertidumbre que si conectamos la salida del splitter a la entrada del analizador directamente.

Como se ha comprobado en el capítulo anterior, el cálculo de la incertidumbre es una labor laboriosa en la que no basta con realizar una suma cuadrática. Se debe tener en cuenta la naturaleza de cada componente de incertidumbre y asociarle un tipo de distribución de densidad de probabilidad adecuado.

Se ha comprobado también que para el cálculo de incertidumbres no basta tan solo con conocer el equipo para el que se va a realizar el cálculo, sino que se necesita tener amplio conocimiento del resto de equipos empleados para su calibración, así como sus características más destacadas, para conocer la adecuación, o no adecuación de un equipo para una determinada prueba. En función de cómo se obtenga la medida, tendremos una ecuación de medida y nos influirán unas componentes u otras de los equipos utilizados.

Tras la finalización del proyecto, concluimos que no sólo se ha realizado el cálculo de incertidumbres de un analizador de espectros, sino que también se ha realizado un profundo estudio del funcionamiento del mismo. No solo se ha limitado a definirlo sino que se ha profundizado en sus aspectos fundamentales y más característicos.

## 7.1 Futuros trabajos

Este proyecto puede servir de base para el cálculo de incertidumbres de cualquier equipo de instrumentación electrónica, aplicando la matemática explicada y desarrollada.

Para ello, obviamente, se debe conocer los aspectos del equipo a analizar y el procedimiento de medida empleado,

El proyecto es abierto y se puede completar para el resto de especificaciones que caracterizan al analizador de espectros.

## 7.2 Mejoras

El proyecto es abierto y puede sufrir mejoras. La primera es no obviando algunas componentes de incertidumbre, para hacer un cálculo más preciso.

Después, se puede estudiar una mejora en los procedimientos de medida, para reducir la incertidumbre y mejorar la precisión. También, los equipos de instrumentación están en constante evolución y sus especificaciones mejoran, por lo que la incertidumbre se ve afectada también, reduciéndose.

## REFERENCIAS

---

- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, primera edición, 1993, revisada y reeditada en 1995, International Standardization Organization (Ginebra, Suiza).
- Julie Xiuyu Cong, Historical Development of Central Limit Theorem; 2003.
- W. Feller: Introducción a la teoría de las probabilidades y sus aplicaciones; Limusa, 1996.
- H. Fischer: The Central Limit Theorem from Laplace to Cauchy; 2000.
- M. Fisz: Probability Theory and Mathematical Statistics; John Wiley & Sons, Inc., 1963.
- International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, segunda edición, 1993, International Standardization Organization (Ginebra, Suiza).
- Measurement Uncertainty Guide, Agilent Technologies.
- International Standard ISO 3534-1 Statistics, Vocabulary and Symbols, Part I: Probability and General Statistical Terms, primera edición, 1993, International Standardization Organization (Ginebra, Suiza).
- Alberto Campillo, Curso de Incertidumbres de Medida, 2008.
- EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. EA European co-operation for Accreditation. December 1999.
- Spectrum-Analysis Fundamentals, Global Education R&B, 1999.
- [http://www.electronicam.es/analizador\\_espectros.html](http://www.electronicam.es/analizador_espectros.html).
- Calibration Guide Agilent Technologies ESA Spectrum Analyzers, Agilent Technologies, Inc. 2000.
- Data Sheet: Agilent ESA Series Spectrum Analyzers.

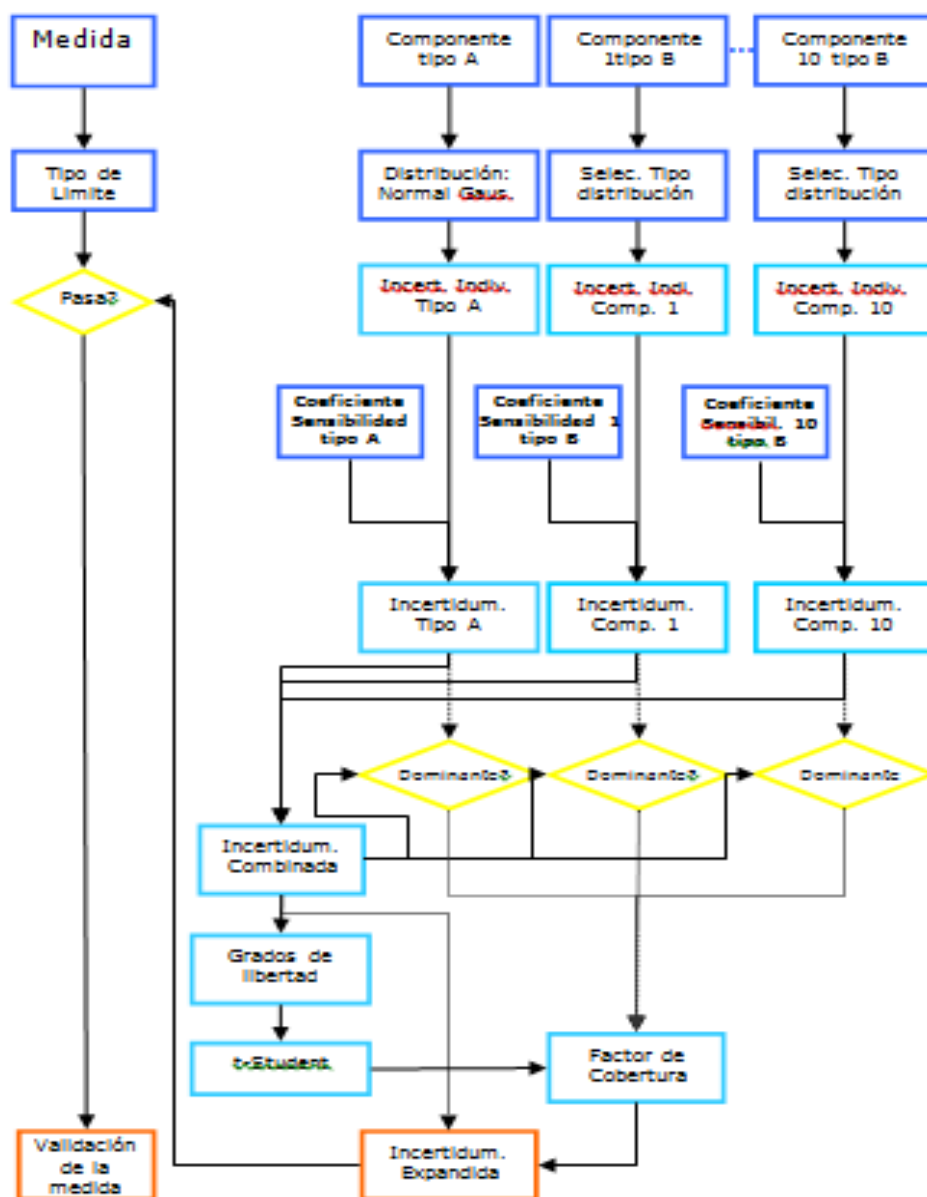
- Data Sheet: EPM Series Power Meters E-Series and 8480 Series Power Sensors, Agilent.



# ANEXOS

---

# ANEXO I. Diagrama de flujo de Tabla de Excel



## **ANEXO II. Especificaciones ESA E4405B**

---

## Keysight Technologies ESA-E Series Spectrum Analyzer


Data Sheet



Available frequency ranges:

E4402B	9 kHz to 3.0 GHz
E4404B	9 kHz to 6.7 GHz
E4405B	9 kHz to 13.2 GHz
E4407B	9 kHz to 26.5 GHz





## Introduction

Customers wanting to take advantage of the ESA flexibility, but who need a faster analyzer for the manufacturing line, or connectivity to LAN/USB in addition to GPIB, or want to do in depth signal analysis with 89600 VSA software, will benefit from the Keysight Technologies, Inc. EXA signal analyzer. For comparison convenience, the EXA specifications are shown in this ESA-E data sheet.

Customers looking for a general-purpose spectrum analyzer will appreciate the flexibility of the Keysight ESA-E Series spectrum analyzer, which can be used for a wide range of applications from aerospace and defense to the manufacturing line. With express analyzer configurations (STD/STG/COM), customers will benefit from faster delivery and its price advantage.

## Table of Contents

- Definition of Specifications
- ESA-E Express Analyzer
- Options
- Frequency Specifications
- Amplitude Specifications
- Tracking Generator
- Quasi-Peak Detector
- General Specifications

## Definition of Specifications

The ESA-E Series spectrum analyzers are tested to ensure they will meet their warranted performance. Unless otherwise stated, all specifications are valid over 0 to 55 °C. Supplemental characteristics, shown in italics, are intended to provide additional information that is useful in using the instrument. These typical (expected) or nominal performance parameters are not warranted but represent performance that 80 percent of the units tested exhibit with 95 percent confidence at room temperature (20 to 30 °C). This data sheet is intended as a quick reference to ESA-E spectrum analyzer specifications, and is by no means complete.

## ESA-E Express Analyzer Options

The ESA-E Series spectrum analyzers have three express analyzer options: STD, STG, and COM.

ESA standard express analyzers (STD/STG): All standard express analyzers include fast time domain sweep, FM demodulation, and GPIB connection. To add the functionality of a tracking generator, only available on the ESA, order the STG option.

ESA communication express analyzers (COM): The ESA communication analyzer includes many additional options required to demodulate select wireless standards.

The EXA X-Series signal analyzer is a great alternative to the ESA-COM express analyzer. All demodulation hardware and speed advantages are standard. In addition, the EXA can run the 89600 VSA software internally to demodulate even the most difficult wireless signals. For a lower cost VSA alternative, many customers are now using the N9064A VXA measurement application for their remote demodulation needs with SCPI programming. The N9064A is only available on the X-Series signal analyzers and is not offered on the ESA spectrum analyzer.

This data sheet is a summary of the complete specifications and conditions, which are available in their entirety in the ESA Specification Guide and EXA Specification Guide. Each of these guides can be found online at [www.keysight.com](http://www.keysight.com) by searching for their respective publication numbers: E4401-90490 or N9010-90012.

## Frequency Specifications

ESA-E spectrum analyzer		EXA signal analyzer (Comparable model number)	
Frequency range	Model	Frequency range	Model
9 kHz to 3.0 GHz	E4402B	10 Hz to 3.6 GHz	N9010A-503
9 kHz to 6.7 GHz	E4404B	10 Hz to 7.0 GHz	N9010A-507
9 kHz to 13.2 GHz	E4405B	10 Hz to 13.6 GHz	N9010A-513
9 kHz to 26.5 GHz	E4407B	10 Hz to 26.5 GHz	N9010A-526
NA		10 Hz to 32.0 GHz	N9010A-532
NA		10 Hz to 44.0 GHz	N9010A-544

Band break				EXA signal analyzer			
ESA-E spectrum analyzer							
Frequency range	Band	Harmonic <sup>(a)</sup> mixing mode		Frequency range	Band	Options	Harmonic <sup>(a)</sup> mixing mode
100 Hz to 3.0 GHz	0	1-		10 Hz to 3.6 GHz	0	503, 507, 513, 526, 532, 544	1-
2.85 to 6.7 GHz	1	1-		3.5 to 7.0 GHz	1	507	1-
6.2 to 13.2 GHz	2	2-		3.5 to 8.4 GHz	1	513, 526, 532, 544	1-
12.6 to 19.2 GHz	3	4-		8.3 to 13.6 GHz	2	513, 526, 532, 544	1- (LO doubled)
18.7 to 26.5 GHz	4	4-		13.5 to 17.1 GHz	3	526, 532, 544	2-
				17.0 to 26.5 GHz	4	526, 532, 544	2- (LO doubled)
				26.4 to 32.0 GHz	5	532	2- (LO doubled)
				26.4 to 34.5 GHz	5	544	2- (LO doubled)
				34.4 to 44.0 GHz	6	544	4- (LO doubled)

Measurement speed			
Local measurement and display update rate	33 ms, (30/s)	Local measurement and display update rate	4 ms (250/s)
Remote measurement and GPIB transfer rate	33 ms, (30/s)	Remote measurement and LAN transfer rate	5 ms (200/s)
Marker peak search	300 ms	Marker peak search	1.5 ms
Center frequency tune and transfer (RF)	< 90 ms	Center frequency tune and transfer (RF)	20 ms
Center frequency tune and transfer ( $\mu$ W)	350 ms	Center frequency tune and transfer ( $\mu$ W)	47 ms

a. N is the harmonic mixing mode. For negative mixing modes (as indicated by the "-"), the desired first LO harmonic is higher than the tuned frequency by the first IF (3.9214 for the 9 kHz to 3 GHz band, 321.4 MHz for all other bands.)

b. N is the harmonic mixing mode. For negative mixing modes (as indicated by the "-"), the desired first LO harmonic is higher than the tuned frequency by the first IF (5.1225 GHz for band 0, 322.5 MHz for all other bands.

## Frequency Specifications (continued)

ESA-E spectrum analyzer		EXA signal analyzer	
STD/STG standard express analyzer	COM express analyzer or ESA-E with Option 1D5	N9010A any frequency range	
Frequency reference			
Frequency reference error = $\pm[(\text{aging rate} \times \text{time since last adjustment}) + \text{settability} + \text{temperature stability}]$		Frequency reference accuracy = $\pm[(\text{aging rate} \times \text{time since last adjustment}) + \text{temperature stability} + \text{calibration accuracy}]$	
Frequency readout accuracy (start, stop, center, marker) = $\pm[(\text{frequency indication} \times \text{frequency reference error} + \text{SP}^a + 15\% \text{ of RBW} + 10 \text{ Hz} + 1 \text{ Hz} \times N^b)]$		Frequency readout accuracy = $\pm[(\text{marker frequency} \times \text{frequency of reference accuracy} + 0.25\% \times \text{span} + 5\% \text{ of RBW} + 2 \text{ Hz} + 0.5 \times \text{horizontal resolution}^c)]$	
Aging rate	$\pm 2 \times 10^{-6}/\text{year}$ $\pm 1 \times 10^{-7}/\text{year}$ (Option 1D5)	$\pm 1 \times 10^{-7}/\text{year}$	Option PFR $\pm 1 \times 10^{-7}/\text{year}$ $\pm 1.5 \times 10^{-7}/2 \text{ years}$ Standard $\pm 1 \times 10^{-6}/\text{year}$
Temperature stability	$\pm 5 \times 10^{-6}$ $\pm 1 \times 10^{-8}$ <sup>d</sup> (Option 1D5)	$\pm 1 \times 10^{-8}$ <sup>d</sup>	Option PFR $\pm 1.5 \times 10^{-8}$ Standard $\pm 2 \times 10^{-6}$
Settability (ESA-E) Internal calibration (EXA)	$\pm 5 \times 10^{-7}$ $\pm 1 \times 10^{-8}$ (Option 1D5)	$\pm 1 \times 10^{-8}$	Option PFR $\pm 4 \times 10^{-8}$ Standard $\pm 1.4 \times 10^{-6}$
Span coefficient (SP) <sup>a</sup>	$[0.5\% + 1/(\text{sweep points} - 1)] \times \text{span}$		
External reference	10 MHz	1 to 30 MHz	
Marker frequency counter <sup>a</sup>			
Accuracy	$\pm[(\text{marker frequency} \times \text{frequency reference error} + \text{counter resolution})]$ Counter resolution = selectable from 1 Hz to 100 kHz		$\pm[(\text{marker frequency} \times \text{frequency reference accuracy} + 0.100 \text{ Hz})]$
Counter resolution	Selectable from 1 Hz to 100 kHz		0.001 Hz
Frequency span			
Range	0 Hz (zero span), 100 Hz to maximum frequency range of the instrument		0 Hz (zero span), 10 Hz to maximum frequency of instrument
Accuracy			
	Linear scale = $\pm[0.5\% \times \text{span} + 2 \times \text{span}/(\text{sweep points} - 1)]$		Swept = $\pm[0.25\% \times \text{span} + \text{horizontal resolution}]$
	Log scale = 2% of span, nominal		FFT = $\pm[0.10\% \times \text{span} + \text{horizontal resolution}]$

a. +5% of span + . Sweep points fixed at 401 for basic analyzer.

b. N is the harmonic mixing mode. For negative mixing modes (as indicated by the "-"), the desired first LD harmonic is higher than the tuned frequency by the first IF (3.9214 for the 9 kHz to 3 GHz band, 321.4 MHz for all other bands.)

c. Horizontal resolution is  $\text{span}/(\text{sweep points} - 1)$ .

d. 20 to 30 °C.

e. Not available in RBW < 1 kHz (Option 1DR.)



### Frequency Specifications (continued)

		ESA-E spectrum analyzer		EXA signal analyzer
		STD/STG standard express analyzer or ESA-E with Option AXX	COM express analyzer or ESA-E with Option B7D/B7E	N9010A any frequency range
<b>Sweep time and trigger</b>				
Range	Span = 0 Hz	50 ns* to 4000 s	25 ns* to 4000 s	1 $\mu$ s to 6000 s
	Span $\geq$ 100 Hz (ESA)	1 ms to 4000 s		
	Span $\geq$ 10 Hz (EXA)			
Accuracy (Span = 0 Hz)		$\pm 1\%$		$\pm 0.01\%$ nominal
Trigger type <sup>b</sup>		Free run, single, line, video, offset, delayed, external		Free run, line, video, external 1, external 2, RF burst, periodic timer
Time gating		Gate (TD6)		Gated LO, gated video, gated FFT
Burst trigger		NA	RF burst (B7E)	Standard
<b>Sweep (trace) points</b>				
Range	Span = 0 Hz	2 to 8192		1 to 40,001
	Span $\geq$ 100 Hz (ESA)	101 to 8192		
	Span $\geq$ 10 Hz (EXA)			

a. RBW  $\geq$  1 kHz, 2 sweep points.

b. TV trigger available with Option B7B in custom configuration for ESA-E.

### Frequency Specifications (continued)

		ESA-E spectrum analyzer		EXA signal analyzer
		STD/STG standard express analyzer	COM express analyzer or ESA-E with Option 1DR and 1DS	N9010A any frequency range
Bandwidth				
Range	-3 dB	1 kHz to 5 MHz <sup>a</sup>	1 Hz to 5 MHz <sup>a</sup>	N/A
	-6 dB EMI	9 kHz, 120 kHz	200 Hz, 9 kHz, 120 kHz	200 MHz, 9 kHz, 120 kHz, 1 MHz (Opt EMC or N6141A required)
	-3.01 dB			1 Hz to 3 MHz (10% steps), 4, 5, 6, 8 MHz
	With 1DR <sup>b</sup>			
	-3 dB	Add 10 Hz - 300 Hz	Included	Narrow RBW is standard in the EXA. Values are same as above
-6 dB EMI	Add 200 Hz			
	With 1DR and 1DS <sup>c</sup>	Add 1 Hz and 3 Hz	Included	
Resolution bandwidth accuracy				
Bandwidth	1 to 300 Hz	±10%	1 Hz to 750 kHz	±1.0% (±0.044 dB)
	1 kHz to 3 MHz	±15%	820 kHz to 1.2 MHz (< 3.6 GHz CF)	±2.0% (±0.088 dB)
	5 MHz	±30%	1.3 to 2.0 MHz (< 3.6 GHz CF)	±0.07 dB nominal
			2.2 to 3 MHz (< 3.6 GHz CF)	±0.15 dB nominal
			4 to 8 MHz (< 3.6 GHz CF)	±0.25 dB nominal
Selectivity (60 dB/3 dB) bandwidth ratio				
Bandwidth	100 to 300 Hz	< 5:1 digital, approximately Gaussian		4.1:1 nominal (all frequency ranges)
	1 kHz to 5 MHz	< 15:1 synchronously tuned four poles, approximately Gaussian		
		Video bandwidths (1-3-10 sequence)		Video bandwidth range
Range with 1DR		30 Hz to 3 MHz. Adds 1, 3, 10 Hz for RBWs less than 1 kHz		Narrow RBW is standard in the EXA
				1 Hz to 3 MHz (10% steps), 4, 5, 6, 8 MHz, and wide open (labeled 50 MHz)

a. For resolution bandwidths < 1 kHz or > 3 MHz, not compatible with the rms detector.  
b. Only available for spans < 5 MHz.  
c. Firmware revision A.08.00 and later.

### Frequency Specifications (continued)

ESA-E spectrum analyzer		EXA signal analyzer	
STD/STG/COM express analyzers		ESA-E with Option 120 <sup>a</sup>	All EXA configurations
Noise sidebands (Phase noise)			
CF = 1 GHz, 1 kHz RBW, 30 Hz VBW, sample detector, with signal $\leq -90$ dBc/Hz from peak of the carrier			CF = 1 GHz
Offset from carrier signal			
10 kHz	-98, -101 dBc/Hz (Option 1D5) <sup>b</sup>	NA	-101 dBc/Hz -105 dBc/Hz
100 kHz	-118, -122 dBc/Hz	NA	-114 dBc/Hz -117 dBc/Hz
1 MHz	-125, -127 dBc/Hz	-133, -136 dBc/Hz	-134 dBc/Hz -137 dBc/Hz
10 MHz	-131, -136 dBc/Hz	-137, -141 dBc/Hz	-148 dBc/Hz (nominal)
Residual FM (peak-to-peak)			
1 kHz RBW and 1 kHz VBW (measurement time)	$\leq 150$ Hz $\times N^c$ (100 ms) $\leq 10$ Hz $\times N^c$ (20 ms), Option 1DR $\leq 2$ Hz peak-to-peak $\times N^c$ (20 ms), Option 1DR and 1D5		Option PFR $\leq 0.25$ Hz $\times N^c$ (20 ms nominal)
Option 1D5 only 100 ms	$\leq 100$ Hz $\times N^c$		Standard $\leq 10$ Hz $\times N^c$ (20 ms nominal)
Option 1DR only 20 ms	$\leq 10$ Hz $\times N^c$		
Option 1DR and 1D5 only 20 ms	$\leq 2$ Hz peak-to-peak $\times N^c$		

a. Enhanced wide offset phase noise and ACPR dynamic range.

b. Option 1DR is required for phase noise measurements at frequency offsets of 10 kHz and less. Performance at 10 kHz offset without Option 1DR is -90 dBc/Hz.

c. N = LO Harmonic mixing number.

## Amplitude Specifications

ESA spectrum analyzer				EXA signal analyzer	
E4402B		E4404B/05B	E4407B	All frequency ranges	
Amplitude range					
Measurement range		Displayed average noise level (DANL) to maximum safe input level		Displayed average noise level (DANL) to -23 dBm	
Mechanical input attenuator range	0 to 75 dB in 5 dB steps	0 to 75 dB in 5 dB steps	0 to 65 dB in 5 dB steps	Standard	0 to 60 dB in 10 dB steps
				Option FSA	0 to 60 dB in 2 dB steps
Electronic input attenuator range				Option EA3	0 to 24 dB in 1 dB steps
				Full attenuation range with EA3*	0 to 84 dB in 1 dB steps
Maximum safe input level					
Average continuous power		+30 dBm (1 W)		+30 dBm (1 W)	
Peak pulse power		+50 dBm (100 W) <sup>a</sup>		< 10 $\mu$ s pulse width, < 1% duty cycle + 50 dBm (100 W) and input attenuation $\geq$ 30 dB	
DC voltage	DC coupled	0 Vdc (Option UKB)	0 Vdc	0 Vdc	$\pm$ 0.2 Vdc
	AC coupled	100 Vdc 50 Vdc (Option UKB)	50 Vdc	50 Vdc (Option UKB)	$\pm$ 100 Vdc
1 dB gain compression					
Total power at input mixer <sup>a</sup>					
Two tone					
50 MHz to 6.7 GHz	0 dBm			Preamp on (P03) 10 MHz to 3.6 GHz	-14 dBm nominal
6.7 to 13.2 GHz	-3 dBm			20 MHz to 26.5 GHz	+9 dBm nominal
13.2 to 26.5 GHz	-5 dBm				

a. Full attenuation range 0 to 84 dB is mechanical + electronic attenuation.

b. < 10  $\mu$ s pulse width, < 1% duty cycle.

c. Mixer power level (dBm) = input power (dBm) - input attenuation (dB).

### Amplitude Specifications (continued)

ESA spectrum analyzer				EXA signal analyzer	
STD/STG express analyzer		COM express analyzer or ESA with 1DR and 1D5		RF/μW (Option 503, 507, 513 or 526)	
E4402B	E4404/05B/07B	E4402B	E4404/05/7B		
Displayed average noise level (dBm) (input terminated, 0 dB attenuation, sample detector) specifications Typical values shown in <i>italic</i>					
Conditions	10 Hz RBW/1 Hz VBW (Option 1DR)		1 Hz RBW/VBW (ESA with Option 1DR and 1D5)		
Frequency					
1 to 10 MHz	-139	-137, -139*	-146, -149*	-147, -149*	-147, -149
10 to 500 MHz	-136, -140	-135, -139	-150	-149	-148, -150
500 MHz - 1 GHz	-135, -140	-150		-150	
1 to 1.5 GHz	-135, -140	-131, -138		-148	-147, -149
1.5 to 2 GHz	-133, -140	-130, -137	NA	-147	-143, -147
2 to 3 GHz	-126, -134	-125, -132		-144	-137, -142
3 to 6 GHz	-125, -132	-142		-134, -140	
6 to 12 GHz	NA	-130, -137		-147	-143, -147
12 to 22 GHz	-126, -134	-125, -132	-142	-134, -140	
22 to 26.5 GHz	NA	-125, -132	-142	-134, -140	
Displayed average noise level (dBm) with RF preamplifier*					
1 to 10 MHz	-152	-155	-162	-165	-161 dBm (nominal)
10 MHz to 1 GHz	-152, -156	-151, -157	-166	-167	-161, -163
1 to 2 GHz	-152, -156	-151, -155	-166	-165	-161, -163
2 to 3 GHz	-151, -154	-149, -152	-164	-162	-160, -162

a. Custom path only. Option 120, typical.

b. 20 to 30 °C. For 0 to 50 °C range see specification guide.

### Amplitude Specifications (continued)

	ESA-E spectrum analyzer (express or custom configuration)	EXA signal analyzer
<b>Spurious responses</b> Typical values shown in <i>italic</i>		
Third order intermodulation distortion (TOI) <sup>a</sup>	For two -30 dBm signals at input mixer <sup>b</sup> and > 50 kHz separation	For two -30 dBm signals at input mixer with tone separation > 5 times IF prefilter bandwidth, 20 to 30 °C, see specification guide for IF prefilter bandwidths
10 to 100 MHz	7 dBm, characteristic	NA
100 to 400 MHz		< -86 dBc, +13 dBm, +17 dBm
400 MHz to 1.7 GHz	< -85 dBc, +12.5 dBm; +16 dBm	
1.7 to 3.0 GHz		
3.0 to 3.6 GHz	< -82 dBc, +11 dBm; +18 dBm	
3.6 to 6.7 GHz		< -88 dBc, +14 dBm, +18 dBm
6.7 to 7.0 GHz	< -75 dBc, +7.5 dBm; +12 dBm	
7.0 to 13.2 GHz		
13.2 to 13.6 GHz	< -75 dBc, +7.5 dBm; +11 dBm	
13.6 to 26.5 GHz		< -84 dBc, +12 dBm, +16 dBm
<b>Second harmonic distortion</b>		
2 to 750 MHz - 40 dBm tone at input mixer <sup>a</sup>		See EXA Data Sheet or EXA Specification Guide for SHI details
10 to 500 MHz - 30 dBm tone at input mixer <sup>a</sup>	< -65 dBc, +35 dBm SHI	
500 MHz to 1.5 GHz - 30 dBm tone at input mixer <sup>a</sup>	< -75 dBc, +45 dBm SHI	
1.5 to 2.0 GHz - 10 dBm tone at input mixer <sup>a</sup>	< -85 dBc, +75 dBm SHI	
> 2 GHz - 10 dBm tone at input mixer <sup>a</sup>	< -100 dBc, +90 dBm SHI	

a. TOI = mixer tone level (in dBm) minus (distortion/2) where distortion is the relative level of the distortion tones in dBc.

b. Mixer power level (dBm) = input power (dBm) - input attenuation (dB).

### Amplitude Specifications (continued)

ESA spectrum analyzer		EKA signal analyzer
STD/STG express analyzer or ESA with Option AYX	COM express analyzer or ESA with Option B7D/B7E	All frequency ranges
<b>Display range</b>		
Log scale	0.1, 0.2, 0.5 dB/division 1 to 20 dB/division in 1 dB steps (10 display divisions)	0.1 to 1 dB/division in 0.1 dB steps 1 to 20 dB/division in 1 dB steps (10 display divisions)
Linear scale	10 divisions	10 divisions
Scale units	dBm, dBmV, dBμV, dBμA, A, V, W, and Hz (Option BAA or AYQ)	dBm, dBmV, dBμV, dBmA, dBμA, V, W, and A
Trace detectors	Peak, negative peak, sample, rmsb, video averaging	Peak, negative peak, sample, normal, log power average, RMS average, and voltage average

ESA spectrum analyzer		EXA signal analyzer	
Standard analyzer or ESA with Option AYX	Communications test analyzer or ESA with Option B7D/B7E	All frequency ranges	
Resolution bandwidth switching uncertainty			
Referenced to 1 kHz at reference level		Referenced to 30 kHz RBW	
1 Hz, 3 Hz RBW	±0.3 dB (Option 1DR, Option 1D5)	±0.3 dB (Option 1D5)	1 Hz to 3 MHz RBW ±0.10 dB
10 Hz, 30 Hz RBW	±0.3 dB (Option 1DR)	±0.3 dB	
100 Hz, 300 Hz RBW	±0.3 dB (Option 1DR)	±0.3 dB	
1 kHz to 1.5 MHz RBW	±0.3 dB		
1.5 to 3 MHz RBW			
5 MHz RBW	±0.6 dB	4, 5, 6, 8 MHz RBW	±1.0 dB

## Amplitude Specifications (continued)

ESA spectrum analyzer		EXA signal analyzer	
Express analyzer or custom analyzer configuration		RF/μW (Option 503, 507, 513 or 526)	
Frequency resolution			
Input attenuator switching uncertainty (at 50 MHz)			
ESA specifications vary with attenuation settings		EXA specifications vary with frequency range	
Attenuator setting		Frequency range	Nominal numbers
0 to 5 dB	±0.3 dB	9 kHz to 3.6 GHz	±0.3 dB
10 dB	Reference	3.5 to 7.0 GHz	±0.5 dB
15 to 60 dB	±(0.1 dB + 0.01 x attenuator setting)	7.0 to 13.6 GHz	±0.7 dB
		13.5 to 26.5 GHz	±0.7 dB
Frequency response (10 dB input attenuation)			
100 Hz to 9 kHz <sup>a</sup>	±0.5 dB	100 Hz to 9 kHz	NA
9 kHz to 3 GHz	±0.46 dB ±0.5 dB (Option UKB)	9 kHz to 10 MHz	±0.8 dB
		10 to 3.6 MHz	±0.6 dB
3 to 6.7 GHz	±1.5 dB	3.5 to 7.0 GHz	±2.0 dB
6.7 to 13.2 GHz	±2 dB	7.0 to 13.6 GHz	±2.5 dB
13.2 to 26.5 GHz	±2 dB	13.5 to 22.0 GHz	±3.0 dB
		22.0 to 26.5 GHz	±3.2 dB
Absolute amplitude accuracy			
At reference settings <sup>b</sup>	±0.34 dB, ±0.13 dB	At reference setting, 50 MHz	±0.40 dB
Preamplifier on	±0.37 dB, ±0.14 dB	Preamplifier on (100 kHz to 3.6 GHz)	±(0.39 dB + frequency response)
Overall amplitude accuracy <sup>c</sup>	±(0.54 dB + absolute frequency response)	At all frequencies	±(0.40 dB + frequency response)
95% confidence <sup>d</sup>	±0.4 dB (95%)	9 kHz to 3.6 GHz (95% confidence)	±0.27 dB

a. Custom path, Option UKB typical.

b. Settings are: reference level -25 dBm; (75 Ω reference level +28.75 dBmV); input attenuation 10 dB; center frequency 50 MHz; RBW 1 kHz; VBW 1 kHz; amplitude scale linear or log; span 2 kHz; frequency scale linear; sweep time coupled, sample detector; signal at reference level.

c. For reference level 0 to -50 dBm; input attenuation 10 dB; RBW 1 kHz; VBW 1 kHz; amplitude scale log, log range 0 to -50 dB from reference level; frequency scale linear; sweep time coupled; signal input 0 to -50 dBm; span ≤ 20 kHz (20 to 30 °C).

d. Input frequency < 3 GHz; -50 dBm ≤ input power ≤ 0 dBm; -50 dBm ≤ reference level ≤ 0 dBm; -20 dB ≤ input power - reference level ≤ 0 dB; input attenuation = 10 dB; 10 Hz ≤ RBW ≤ 1 MHz (20 to 30 °C). Computed from the observation of a statistically significant number of instruments. Observations of the 50 MHz amplitude accuracy, a component of the computation of this number is performed immediately after invoking RF and IF alignments to minimize the effects of alignment drifts.



### Amplitude Specifications (continued)

ESA spectrum analyzer		EXA signal analyzer
Express analyzer or custom analyzer configuration		All frequency ranges
Display scale fidelity Typical values shown in <i>italic</i>		
> 0 to 10 dB	$\pm 0.3$ dB, $\pm 0.08$ dB	$\pm 0.15$ dB
> 10 to 20 dB	$\pm 0.4$ dB, $\pm 0.09$ dB	
> 20 to 30 dB	$\pm 0.5$ dB, $\pm 0.1$ dB	
> 30 to 40 dB	$\pm 0.6$ dB, $\pm 0.23$ dB	
> 40 to 50 dB	$\pm 0.7$ dB, $\pm 0.35$ dB	
> 50 to 60 dB	$\pm 0.7$ dB, $\pm 0.35$ dB	
> 60 to 70 dB	$\pm 0.8$ dB, $\pm 0.39$ dB	
> 70 to 80 dB	$\pm 0.8$ dB, $\pm 0.46$ dB	NA
> 80 to 85 dB	$\pm 1.15$ dB, $\pm 0.79$ dB	
Residual responses (input terminated and 0 dB attenuation)		
50 $\Omega$ RF input impedance		
150 kHz to 1.5 GHz/6.7 GHz <sup>a</sup>	< -90 dBm	
200 kHz to 8.4 GHz (swept)		-100 dBm

a. Up to 1.5 GHz for E4402B. Up to 6.7 GHz for E4404B/05B/07B.

## Tracking Generator

In order to gain tracking generator functionality, Option 1DN or express analyzer Option STG must be ordered with an ESA-E spectrum analyzer. Tracking generator functionality is not available on the EXA signal analyzer.

EXA offers Option ESC (external source control) for the scalar stimulus-response tests.

For other low cost tracking generator alternatives to the ESA spectrum analyzer customers should consider one of the following instruments:

- N9000A CXA signal analyzer
- N9340A handheld RF spectrum analyzer
- N9320B RF spectrum analyzer

### Tracking generator specifications (Options 1DN and STG)

	E4402B/04B/05B/07B
Frequency range	9 kHz to 3.0 GHz
RBW range	1 kHz to 5 MHz
Output power level range	-2 to -66 dBm
Output vernier range	8 dB
Output attenuator range	0 to 56 dB, 8 dB steps
<b>Output flatness</b>	
9 kHz to 10 MHz	$\pm 3.0$ dB
10 MHz to 3.0 GHz	$\pm 2.0$ dB
<b>Effective source match (characteristic)</b>	
	< 2.0:1 (0 dB attenuator)
	< 1.5:1 (8 dB attenuator)
<b>Spurious output</b>	
20 kHz to 3 GHz (-1 dBm output)	< -25 dBc
<b>Non-harmonic spurs</b>	
9 kHz to 2 GHz	< -27 dBc
2 to 3 GHz	< -23 dBc
<b>Dynamic range</b>	
Output power sweep range	Maximum output power - displayed average noise level (-10 to -2 dBm) - (source attenuator setting)

### Quasi-Peak Detector

Add a quasi-peak detector, Option AYQ, to the ESA-E custom analyzer configuration. Option AYQ also includes FM demodulation capability. The quasi-peak detector displays the quasi-peak amplitude of a pulse radio frequency on continuous wave signals. Amplitude response conforms to Publication 16 of the Comité International Spécial des Perturbations Radioélectrique (CISPR) Section 1, Clause 2, as indicated in the relative quasi-peak response table.

The EXA signal analyzer gains quasi-peak functionality with Option EMC. For more information refer to the EXA Specification Guide literature number: N9010-90012.

ESA Custom configuration with Option AYQ (requires Option TDR)

Relative quasi-peak response to a CISPR pulse (dB)

Pulse repetition frequency (Hz)	120 kHz EMI BW 0.03 to 1 GHz	9 kHz EMI BW 0.150 to 30 MHz	200 Hz EMI BW 9 to 150 kHz
1000	+8.0 ±1.0	+4.5 ±1.0	NA
100	0 dB reference <sup>a</sup>	0 dB reference <sup>a</sup>	+4.0 ±1.0
60	NA	NA	+3.0 ±1.0
25	NA	NA	0 dB reference <sup>a</sup>
20	-9.0 ±1.0	-6.5 ±1.0	NA
10	-14 ±1.5	-10.0 ±1.5	-4.0 ±1.0
5	NA	NA	-7.5 ±1.5
2	-26 ±2.0	-20.5 ±2.0	-13.0 ±2.0
1	NA	-22.5 ±2.0	-17.0 ±2.0
Isolated pulse	NA	-23.5 ±2.0	-19.0 ±2.0

a. Reference pulse amplitude accuracy relative a 66  $\mu$ V CW signal < 1.5 dB as specified in CISPR Pub 16  
CISPR reference pulse: 0.44  $\mu$ Vs for 30 MHz to 1 GHz, 0.316  $\mu$ Vs for 150 kHz to 30 MHz, 13.5  $\mu$ Vs for 9 kHz to 150 kHz.

## General Specifications

	ESA-E spectrum analyzer E4402B/E4404B/E4405B/E4407B	ESA signal analyzer All frequency ranges
<b>Temperature range</b>		
Operating	0 to +55 °C	0 to +55 °C
Storage	-40 to +75 °C	-40 to +70 °C
Disk drive	10 to +40 °C	NA
<b>EMI compatibility</b>		
	Conducted and radiated interference is in compliance with CISPR Pub. 11/1990 Group 1 Class A. Conducted and radiated interference is in compliance with CISPR Pub. 11/1990 Group 1 Class Ba (Option 060)	Complies with European EMC Directive 2004/108/EC IEC/EN 61326-1 or IEC/EN 61326-2-1 CISPR Pub 11 Group 1, class A AS/NZS CISPR 11 <sup>a</sup> ICES/NMB-001 This ISM device complies with Canadian ICES-001. Cet appareil ISM est conforme à la norme NMB-001 du Canada.
<b>Military specifications</b>		
	Type tested to the environmental specifications of MIL-PRF-28800F Class 3	Test methods are aligned with IEC 60068-2 and levels are similar to MIL-PRF-28800F Class 3
<b>Power requirements</b>		
AC operation on (line I)	90 to 132 Vrms, 47 to 440 Hz 195 to 250 V rms, 47 to 66 Hz Power consumption < 300 W	100 to 120 V, 50, 60 or 400 Hz 220 to 240 V, 50 or 60 Hz Power consumption < 350 W
Standby (line I)	Power consumption < 5 W	Power consumption < 20 W
DC operation	12 to 20 Vdc, < 200 W power consumption	NA
<b>Data storage (nominal)</b>		
Internal <sup>b</sup>	200 traces or states/8.0 MB	
External	3.5" in, 1.44 MB, MS-DOS	80 GB Supports USB 2.0-compatible memory device
<b>Memory usage (nominal)</b>		
State	16 kB <sup>c</sup>	
State plus 401-point trace	20 kB <sup>c</sup>	
Display resolution <sup>d</sup>	640 x 480	1024 x 768

a. Meeting Class A performance during DC operation.

b. For serial numbers < US414400 or MY41440000, 1 MB without Option B72, 8 Mb with Option B72.

c. 401 sweep points. The size of a state will increase depending on the installed application(s).

d. The ESA-E LCD display is manufactured using high precision technology. However, there may be up to six bright points (white, blue, red or green in color) that constantly appear on the LCD screen. These points are normal in the manufacturing process and do not affect the measurement integrity of the product in any way.

## General Specifications (continued)

	ESA-E spectrum analyzer	EXA signal analyzer
<b>Inputs/Outputs</b>		
<b>Front panel</b>		
Input RF	50 $\Omega$ type N (f), or 50 $\Omega$ APC 3.5 (m) (Option BAB)	50 $\Omega$ type N (f)
Probe power	+15 Vdc, -12.6 Vdc at 150 mA maximum (characteristic/nominal)	+15 Vdc, -12.6 Vdc at 150 mA maximum (characteristic/nominal)
External keyboard	6-pin mini-DIN, PC keyboards (for entering screen titles and file names)	Compatible with USB 2.0
<b>Rear panel</b>		
10 MHz REF OUT	50 $\Omega$ BNC (f), > 0 dBm (characteristic)	50 $\Omega$ BNC (f), nominal
10 MHz REF IN	50 $\Omega$ BNC (f), -15 to -10 dBm (characteristic)	50 $\Omega$ BNC (f), nominal
GATE TRIG/EXT TRIG IN	BNC (f), 5 V TTL	BNC (f), 5 V TTL
GATE /HI SWP OUT	BNC (f), 5 V TTL	NA
VGA OUTPUT	VGA compatible monitor, 15-pin mini D-SUB	VGA compatible monitor, 15-pin mini D-SUB
<b>Interfaces</b>		
GPIO interface IEEE-488 bus connector	Option A4H	Standard
Serial interface	Option 1AX, RS-232, 9-pin D-SUB (m)	NA
Parallel interface	Option A4H or 1AX 25-pin D-SUB (f) printer port only	NA
<b>I/O connectivity software</b>		
	IO Libraries Suite ( <a href="http://www.keysight.com/find/iosuite">www.keysight.com/find/iosuite</a> )	IO Libraries Suite ( <a href="http://www.keysight.com/find/iosuite">www.keysight.com/find/iosuite</a> )
<b>Dimensions</b>		
Width to outside of instrument handle	416 mm (16.4 in)	426 mm (16.8 in)
Overall height	222 mm (8.75 in)	177 mm (7.0 in)
Depth from front frame to rear frame	409 mm (16.1 in)	368 mm (14.5 in)
<b>Weight</b>		
	E4402B	E4404B/E4405B/E4407B
Instrument	15.5 kg (34.2 lbs)	17.1 kg (37.7 lbs)
Shipping	27.4 kg (60.4 lbs)	31.9 kg (70.3 lbs)
		All EXA signal analyzers
		16 kg (35 lbs) nominal
		28 kg (62 lbs) nominal

19 | Keysight | ESA-E Series Spectrum Analyzer - Data Sheet

**myKeysight**

[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)

A personalized view into the information most relevant to you.

[www.axiestandard.org](http://www.axiestandard.org)



AdvancedTCA® Extensions for Instrumentation and Test (AXIe) is an open standard that extends the AdvancedTCA for general purpose and semiconductor test. Keysight is a founding member of the AXIe consortium. ATCA®, AdvancedTCA®, and the ATCA logo are registered US trademarks of the PCI Industrial Computer Manufacturers Group.

[www.lxi-standard.org](http://www.lxi-standard.org)



LAN eXTensions for Instruments puts the power of Ethernet and the Web inside your test systems. Keysight is a founding member of the LXI consortium.

[www.pxisa.org](http://www.pxisa.org)



PCI eXTensions for Instrumentation (PXI) modular instrumentation delivers a rugged, PC-based high-performance measurement and automation system.

**Three-Year Warranty**

[www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty](http://www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty)

Keysight's commitment to superior product quality and lower total cost of ownership. The only test and measurement company with three-year warranty standard on all instruments, worldwide.

**Keysight Assurance Plans**

[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)

Up to five years of protection and no budgetary surprises to ensure your instruments are operating to specification so you can rely on accurate measurements.

[www.keysight.com/quality](http://www.keysight.com/quality)

Keysight Technologies, Inc.  
DEXRA Certified ISO 9001:2008  
Quality Management System

**Keysight Channel Partners**

[www.keysight.com/find/channelpartners](http://www.keysight.com/find/channelpartners)

Get the best of both worlds: Keysight's measurement expertise and product breadth, combined with channel partner convenience.

[www.keysight.com/find/esa](http://www.keysight.com/find/esa)

For more information on Keysight

Technologies' products, applications or services, please contact your local Keysight office. The complete list is available at:

[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

**Americas**

Canada	(877) 894 4414
Brazil	55 11 3351 7010
Mexico	001 800 254 2440
United States	(800) 829 4444

**Asia Pacific**

Australia	1 800 629 485
China	800 810 0189
Hong Kong	800 938 893
India	1 800 112 929
Japan	0120 (421) 345
Korea	080 789 0900
Malaysia	1 800 888 848
Singapore	1 800 375 8100
Taiwan	0800 047 888
Other AP Countries	(85) 6375 8100

**Europe & Middle East**

Austria	0800 001122
Belgium	0800 58580
Finland	0800 523252
France	0805 980333
Germany	0800 6270999
Ireland	1800 832700
Israel	1 809 343051
Italy	800 599100
Luxembourg	+32 800 58580
Netherlands	0800 0233200
Russia	8800 5009286
Spain	0800 000154
Sweden	0200 882255
Switzerland	0800 805353
	Opt. 1 (DE)
	Opt. 2 (FR)
	Opt. 3 (IT)
United Kingdom	0800 0280637

For other unlisted countries:

[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)  
(BP-07-10-14)



This information is subject to change without notice.  
© Keysight Technologies, 2011-2014  
Published in USA, August 4, 2014  
5989-9815EN  
[www.keysight.com](http://www.keysight.com)

## **ANEXO III. NORMA ISO/IEC 17025**

---



*Criterios generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración según norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005*

CGA-ENAC-LEC Rev. 6 Octubre 2014

INDICE

Página

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. CRITERIOS GENERALES DE ACREDITACIÓN .....	1

ANEXO I: MÉTODOS DE ENSAYO Y CALIBRACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La Norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005 establece los requisitos generales relativos a la competencia técnica de los laboratorios de ensayo y calibración que ENAC utiliza como criterios para la acreditación.

En algunos casos es preciso aclarar o precisar el contenido o interpretación de algunos apartados de la norma cuando ésta va a ser usada en un proceso de acreditación con el fin de asegurar la coherencia en la evaluación.

El presente documento establece dichas aclaraciones y precisiones que deben ser consideradas por los laboratorios como criterios a cumplir en caso de solicitar la acreditación de ENAC y que por lo tanto serán evaluados durante los procesos de acreditación de ENAC.

Los criterios aquí expuestos pueden ser complementados por otros de carácter sectorial o específico que están disponibles en su caso en [www.enac.es](http://www.enac.es).

Este documento ha sido elaborado con la participación de la Asociación de Entidades de Ensayo, Calibración y Análisis (FELAB)- (EUROLAB España- Asociación Española de Laboratorios de Ensayo, Calibración y Análisis/ AELI Asociación Española de Laboratorios Independientes) en representación de los laboratorios acreditados.

2. CRITERIOS GENERALES DE ACREDITACIÓN

Se ha mantenido la numeración de la norma, incluyendo una C delante de la referencia numérica del apartado de la norma al que corresponde para facilitar su identificación.

4.1 Organización

C 4.1.4 El laboratorio debe analizar y documentar todas las actividades que realiza diferentes a las de ensayo o calibración, identificar aquellas que puedan suponer un conflicto de interés, documentar las medidas que adopta para demostrar que dichos conflictos se eliminan. En el caso de que el laboratorio pertenezca a una organización superior el análisis debe tener en cuenta las actividades realizadas por dicha organización.

C 4.1.4 NOTA 2: La acreditación no supone el reconocimiento específico por parte de ENAC de la actuación del laboratorio como 1ª, 2ª o 3ª parte.

4.4 Revisiones de los pedidos, ofertas y contratos

C 4.4.1 En la selección del método el laboratorio deberá tener en cuenta también, cuando sea aplicable, los aspectos reglamentarios que afecten al ensayo o calibración solicitado.

C 4.4.1 NOTA 3: En el caso de acuerdos orales, y con el fin de demostrar el cumplimiento de la cláusula 4.4.1 el laboratorio deberá mantener registros de los términos acordados con el cliente.





*Criterios generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración según norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005*

CGA-ENAC-LEC Rev. 6 Octubre 2014

#### 4.5 Subcontratación de ensayos y de calibraciones

C 4.5.1 a) ENAC acreditará al laboratorio únicamente para aquellas actividades para las que demuestre que dispone de los medios y la competencia necesaria para ejecutarlos por sí mismo.

C 4.5.4 Sólo se aceptará como "evidencia del cumplimiento de esta norma" que el laboratorio subcontratado esté acreditado por ENAC o por cualquier organismo de acreditación con que ENAC haya firmado un acuerdo de reconocimiento (EA, ILAC, ...<sup>1</sup>) para el/los ensayo/s subcontratado/s.

#### 5.2 Personal

C 5.2.1 Para demostrar el cumplimiento con esta cláusula el laboratorio deberá establecer una sistemática documentada para la cualificación y autorización de éste así como para el mantenimiento de dicha cualificación.

#### 5.4 Métodos de ensayo y de calibración y validación de los métodos

Véase Anexo I

##### 5.4.6 Estimación de la incertidumbre de la medición

C 5.4.6.1 Los cálculos de incertidumbres asociados a calibraciones se desarrollarán de acuerdo a lo establecido en el documento EA 4/02 (disponible en [www.enac.es](http://www.enac.es)).

Los cálculos de incertidumbre asociada a resultados de ensayo, se desarrollarán teniendo en cuenta el documento G-ENAC-09.

#### 5.6 Trazabilidad de las mediciones

##### 5.6.2.1 Calibración

C 5.6.2.1.1 Los certificados de calibración externa deberán incluir la marca de acreditación de ENAC o de cualquier organismo de acreditación con que ENAC haya firmado un acuerdo de reconocimiento (EA, ILAC, ...<sup>2</sup>) o haber sido emitidos por laboratorios nacionales firmantes del acuerdo de reconocimiento mutuo de CIPM<sup>3</sup>.

Si el laboratorio puede demostrar que no es posible el recurso a las vías anteriores, podría admitirse certificados de calibración emitidos por laboratorios de calibración no cubiertos por los citados acuerdos de reconocimiento o por laboratorios nacionales no firmantes del acuerdo de reconocimiento CIPM, siempre y cuando el laboratorio pueda aportar evidencias a ENAC que demuestren, que el laboratorio contratado asegura la trazabilidad metrológica de las medidas, que la incertidumbre de medida está correctamente calculada y que tiene suficiente competencia técnica.

<sup>1</sup> Para su correcta identificación consultar en: [www.european-accreditation.org](http://www.european-accreditation.org); o bien en [www.ilac.org](http://www.ilac.org)

<sup>2</sup> Para su correcta identificación consultar en: [www.european-accreditation.org](http://www.european-accreditation.org); o bien en [www.ilac.org](http://www.ilac.org)

<sup>3</sup> Para su correcta identificación consultar en: [www.bipm.org](http://www.bipm.org)



*Criterios generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración según norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005*

CGA-ENAC-LEC Rev. 6 Octubre 2014

Las citadas evidencias (los números hacen referencia a cláusulas de la norma ISO 17025:2005) deberían incluir, al menos:

- Registros de la validación de los procedimientos de calibración (5.4.5)
- Procedimientos para el cálculo de incertidumbre (5.4.6)
- Documentación sobre la trazabilidad metrológica de las mediciones (5.6)
- Documentación sobre el aseguramiento de la calidad de los resultados (5.9)
- Documentación sobre la competencia del personal (5.2)
- Documentación sobre las instalaciones y las condiciones ambientales (5.3)
- Auditorías internas (4.6.4 y 4.14)

El laboratorio debe disponer de la competencia técnica adecuada como para analizar dichos registros y emitir un juicio justificado sobre la competencia del laboratorio contratado. En caso necesario ENAC podrá auditar al laboratorio contratado para contrastar la información aportada por lo que el laboratorio deberá disponer de los acuerdos necesarios con el laboratorio que contrata para que dicha auditoría sea posible.

**C 5.6.3.2 Materiales de referencia**

C 5.6.3.2 En la selección y uso de los Materiales de Referencia, el laboratorio deberá tener en cuenta lo establecido en la ISO Guide 33 "Uses of certified reference materials" y en el documento ILAC P10 "Política de ILAC sobre la Trazabilidad de los Resultados de Medición" (disponible en español en la página web de Inter American Accreditation Cooperation (IAAC) <http://www.iaac.org.mx>).

**C 5.7 Muestreo**

C 5.7 Véase NT-43: "Laboratorios de ensayo: Acreditación de muestreo y toma de muestra"

**5.8 Manipulación de los ítems de ensayo o de calibración**

C 5.8.3 El registro requerido en la cláusula 5.8.3 incluye también el indicar la falta de adecuación de la muestra para un ensayo en el informe de resultados (véase también la cláusula 5.10.2.f). En los casos de muestras cuya adecuación plantea dudas al laboratorio indicará claramente en el informe que los resultados de ensayo podrían estar afectados por las condiciones de recepción de la muestra.

**C 5.9 Aseguramiento de la calidad de los resultados de ensayos y de calibración**

C 5.9 Las políticas, los procedimientos y el programa de participación en intercomparaciones deberán tener en cuenta lo establecido en el documento NT-03 "Política de ENAC sobre Intercomparaciones".

**5.10 Informe de los resultados**

C 5.10.1.a Si el laboratorio emite informes o certificados simplificados en los que hace uso de la marca de acreditación o referencia a la condición de acreditado, deberá acordar con el cliente el contenido de éstos y, al menos, deberán incluir la siguiente información:

- Identificación única que incluya una mención explícita a que es un informe o certificado simplificado.
- Nombre del laboratorio.



*Criterios generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración según norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005*

CGA-ENAC-LEC Rev. 6 Octubre 2014

- Resultados.
- Firma del responsable o seguridad de haber sido emitido por él si se trata de un informe electrónico.
- Una declaración de que la información completa relativa a los ensayos o calibraciones está a disposición del cliente.

C.5.10.1.b En el caso de *laboratorios internos* (entendiendo como tales a aquellos que prestan sus servicios a la empresa de la que forman parte) el laboratorio deberá identificar al departamento o departamentos de ésta que actúe(n) como cliente interno.

C.5.10.1.c Si el laboratorio no va a emitir informes tal y como los entiende el apartado 5.10 de la norma debe documentar dicho compromiso en su sistema y debe describir de manera clara cuál es el método que utiliza para informar de los resultados a su cliente. En caso de que exista la posibilidad de emitir informes (p.e: si los clientes internos pueden en ocasiones requerir la emisión de informes o si el laboratorio presta servicios tanto internos como a terceras partes) deberá tener una sistemática documentada de cómo emitirá los informes de ensayo que le soliciten y estar en disposición de demostrar su correcto funcionamiento.

#### C.5.10.2 Informes de ensayo y certificados de calibración

Los laboratorios que realicen ensayos / calibraciones con respecto a revisiones obsoletas de normas deberán indicar en los informes de ensayo / certificados de calibración que dicha edición no corresponde a la última versión publicada.

C.5.10.2.j Para determinar qué puede ser considerado una "identificación equivalente" a una firma es preciso primero entender qué se persigue al exigir la inclusión de la firma y que no es otra cosa que identificar de manera inequívoca que los informes/certificados han sido emitidos con la autorización del laboratorio y que pueden ser identificados para usarlos como única referencia válida en caso de necesidad.

Cuando el laboratorio emite informe en papel con firma manuscrita que envía al cliente o mediante un documento en soporte electrónico con firma electrónica que cumpla los requisitos contemplados en la legislación aplicable, se garantiza lo anterior y, por tanto, ambas son igualmente aceptables a efectos del cumplimiento con el requisito de la norma.

Cuando el laboratorio utilice cualquier otra identificación diferente de la firma debería tener en cuenta su validez legal y debería acordar con el destinatario del informe si dicha identificación es aceptable para él y recogerlo contractualmente. En cualquier caso en lo que al cumplimiento de la norma se refiere, para que ENAC considere dicha identificación como equivalente a una firma, el laboratorio debe demostrar que se cumplen las condiciones siguientes:

- 1) Que la identificación sólo puede incluirse con la autorización de la persona responsable de autorizar el informe/certificado (según establece la cláusula 5.10.2.j).
- 2) que existe una relación biunívoca entre las identificaciones y las personas autorizadas a utilizarlas de manera que se identifica de manera inequívoca a las personas propietarias de cada una.
- 3) que el laboratorio es capaz de identificar de manera inequívoca el informe/certificado efectivamente emitido por él y que será contra el cual el laboratorio comparará cualquier posible copia para garantizar su veracidad. Dicho documento puede estar en papel o ser un archivo electrónico. En este último caso el laboratorio deberá poder identificar el archivo concreto.



*Criterios generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración según norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005*

CGA-ENAC-LEC Rev. 6 Octubre 2014

- 4) Que, cuando el documento identificado por el laboratorio como el efectivamente emitido por él sea un archivo informático, cualquier impresión de dicho archivo será considerada como una copia. No obstante, si el cliente así lo solicita, el laboratorio le proporcionará una copia autenticada (mediante firma manuscrita o electrónica) de dicho documento.

**C 5.10.3 Informes de ensayo**

**C 5.10.3.1**

b) El documento G-ENAC-15. "Directrices para informar sobre el cumplimiento con especificaciones" es de aplicación cuando en los informes de ensayo se declara cumplimiento con especificaciones.

c) Una de las circunstancias en las que la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005 establece la necesidad de que el laboratorio incluya la incertidumbre de medición estimada en el informe de ensayo es "cuando la incertidumbre afecte al cumplimiento con los límites de una especificación". Esta situación se considera aplicable, tanto si dicha especificación ha sido comunicada explícitamente al laboratorio por su cliente o, de manera implícita, cuando los ensayos solicitados tienen como fin el comprobar el cumplimiento de una especificación conocida por ser pública y la habitualmente utilizada para comparar los resultados de dichos ensayos.

**C 5.10.4 Certificados de calibración**

C 5.10.4.2 El documento G-ENAC-15. "Directrices para informar sobre el cumplimiento con especificaciones" es de aplicación cuando en los informes de calibración se declara cumplimiento con especificaciones.

**C 5.10.5 Opiniones e Interpretaciones**

C 5.10.5 Las opiniones e interpretaciones no son objeto de acreditación por parte de ENAC. En caso de incluirlas en informes de ensayo, deberán marcarse como no acreditados (véase el documento de ENAC que regula la utilización de la marca ENAC o referencia a la condición de acreditado).

"El presente documento se distribuye como copia no controlada. Puede consultar su revisión en la página web de ENAC ([www.enac.es](http://www.enac.es)), a través del icono documentos o internamente en red."



**Criterios generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración según norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005**

CGA-ENAC-LEC Rev. 6 Octubre 2014

Anexo I

**ANEXO I: MÉTODOS DE ENSAYO Y CALIBRACIÓN**

**A.1 OBJETO**

La norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005 en su apartado 5.4.2 establece que *"El laboratorio debe utilizar métodos de ensayo y calibración que satisfagan las necesidades del cliente y sean apropiados para el uso previsto. Se deben utilizar preferentemente los métodos publicados como normas internacionales, regionales o nacionales. Además, la norma establece que el laboratorio debe seleccionar los métodos apropiados que hayan sido publicados en normas internacionales, regionales o nacionales, por organizaciones técnicas reconocidas o en libros o revistas científicas especializados o especificados por el fabricante del equipo."*

También indica la norma que se pueden utilizar métodos totalmente desarrollados por el laboratorio o adaptados por éste basados en métodos normalizados, siempre y cuando sean apropiados para el uso previsto y hayan sido validados.

Por su parte ENAC, en su proceso de acreditación debe obtener del laboratorio evidencias suficientes de que los métodos incluidos en los alcances son válidos. En este sentido se considera necesario recalcar las ventajas que aporta a los laboratorios el recurso a métodos normalizados para demostrar la validez de los métodos y la fiabilidad de los resultados.

Por otra parte, es importante recordar que la norma UNE-EN/ISO 17025:2005 establece requisitos para que los laboratorios puedan demostrar su competencia y no para evaluar la validez de un método determinado y consecuentemente los procesos de evaluación de ENAC no han sido diseñados con ese fin por lo que en el caso de métodos desarrollados *ex novo* por el laboratorio ENAC podrá requerir evidencias complementarias que avalen su validez.

El objeto de este Anexo es documentar los criterios de evaluación de ENAC a la hora de determinar si el laboratorio ha demostrado de manera adecuada la validez de los métodos para los que solicita la acreditación.

**A.2 DEFINICIONES**

**Métodos normalizados.** Son métodos desarrollados por organizaciones reconocidas<sup>4</sup> y aceptados por el sector técnico en cuestión, en la bibliografía de referencia (libros, revistas científicas, congresos científicos, etc) o los especificados por los fabricantes de los equipos<sup>5</sup>. Los métodos publicados en normas (UNE, EN, ISO, etc), por Laboratorios de Referencia<sup>6</sup> o en documentos reglamentarios serán considerados como métodos normalizados a todos los efectos.

**Métodos basados en métodos normalizados.** Métodos descritos en procedimientos internos del laboratorio, que están claramente basados en métodos normalizados por lo que su validez y adecuación al uso se justifican principalmente por referencia al método normalizado.

**Métodos desarrollados por el laboratorio.** Son aquellos métodos distintos de los anteriores desarrollados por el propio laboratorio<sup>7</sup>.

<sup>4</sup> Dichas organizaciones pueden ser centros de investigación; universidades; fabricantes, diseñadores, o compradores del producto a ensayar, etc y su aceptación por el sector técnico en cuestión debe estar fuera de toda duda para ser aceptados por ENAC como fuente fiable de elaboración de métodos normalizados.

<sup>5</sup> En este caso ENAC puede solicitar al laboratorio que le aporte evidencias de la validación del método.

<sup>6</sup> Se entenderá por tales a estos efectos aquellos que han sido oficialmente designados.

<sup>7</sup> O por organizaciones externas al laboratorio diferentes a las indicadas en la Nota 5.



*Criterios generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración según norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005*

CGA-ENAC-LEC Rev. 6 Octubre 2014

Anexo I

**A.3 DEMOSTRACIÓN DE LA VALIDEZ Y ADECUACIÓN AL FIN PREVISTO DE LOS MÉTODOS**

Según la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005 "la validación es la confirmación, a través del examen y el aporte de evidencias objetivas, de que se cumplen los requisitos particulares para un uso específico previsto". Por tanto los laboratorios deben demostrar la validez y adecuación al fin previsto de los métodos presentados para su acreditación.

La naturaleza y extensión de las actividades de validación y de las evidencias a presentar a ENAC para demostrar dicha validez dependerá del tipo de método seleccionado:

**A.3.1 Métodos normalizados y basados en métodos normalizados**

Las desviaciones frente al método normalizado, respetando los principios o fundamentos de dicho método, podrán justificarse, siempre que sean adecuados para el fin previsto, entre otras razones en respuesta a requerimientos del cliente adecuación al progreso técnico y tecnológico, obsolescencia del documento normativo, etc.

El laboratorio, tal y como establece la norma, deberá en estos casos: "confirmar que puede aplicar correctamente los métodos normalizados antes de utilizarlos para los ensayos".

Para ello, en el caso de utilizar métodos normalizados, el laboratorio deberá asegurar el cumplimiento de los requisitos mencionados en estos y demostrar que puede aplicarlos correctamente teniendo en cuenta los medios disponibles en el laboratorio (instalaciones, equipamiento, personal, etc.), asegurando que éstos proporcionan resultados con las calidades requeridas. Dichas calidades (linealidad, repetibilidad, reproducibilidad, intervalo de aplicación, límite de detección, veracidad, exactitud, etc...) deben responder a las necesidades de los clientes y al uso previsto de dichos métodos.

En el caso de utilizar métodos basados en métodos normalizados, el laboratorio deberá asegurar que los parámetros de funcionamiento obtenidos responden a los criterios establecidos a priori por el laboratorio en función de las necesidades de los clientes y de los recursos disponibles en el laboratorio y que son adecuados al uso previsto frente a las aportaciones realizadas por el laboratorio (es recomendable que el laboratorio justifique sus decisiones en este sentido apoyándose en bibliografía técnica). Para ello, puede ser necesario extender el proceso de confirmación descrito en el apartado anterior.

**A.3.2 Métodos desarrollados por el laboratorio.**

En este caso sí se requiere una validación completa conforme a la cláusula 5.4.5 de la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005.

La validación debe ser tan amplia como sea necesario para satisfacer las necesidades del tipo de aplicación o del campo de aplicación dados, justificando que el desarrollo de estos métodos es adecuado para ejecutar el ensayo o calibración. Por tanto, para este tipo de métodos, el laboratorio deberá disponer de evidencias de haber sido evaluada su idoneidad con el fin propuesto, empleando sistemáticas de validación reconocidas para este fin. ENAC deberá tener acceso a las evidencias que demuestren que dichos métodos han sido adecuadamente validados. El laboratorio deberá disponer información suficiente sobre el trabajo experimental realizado para la validación del método así como de las evidencias de su adecuado funcionamiento en el laboratorio. Dicha información deberá demostrar de manera indiscutible la validez del método.





*Criterios generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y  
calibración según norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005*

CGA-ENAC-LEC Rev. 6 Octubre 2014

Anexo I

La elección de un método desarrollado por el laboratorio cuando existe un método normalizado debe ser justificada técnicamente. No obstante, en determinadas circunstancias y entornos técnicos, por ejemplo, cuando existe un amplio consenso científico sobre el método a seguir en determinado ensayo o calibración, ante ensayos o calibraciones de alto riesgo o cuando así lo aconseje el entorno regulatorio o las expectativas del mercado, ENAC puede no aceptar solicitudes de acreditación basadas en estos métodos. En estos casos se informará de ello al solicitante.